

**UNIVERSITE MONTESQUIEU - BORDEAUX IV**

**ECOLE DOCTORALE ENTREPRISE, ECONOMIE, SOCIETE (E.D. 42)**

**DOCTORAT ès SCIENCES ECONOMIQUES**

**Isabelle SALLE**

**APPRENTISSAGE, HÉTÉROGÉNÉITÉ  
ET POLITIQUE MONÉTAIRE**

Une Application aux Régimes de Ciblage de l’Inflation

Thèse co-dirigée par

M. **Marc-Alexandre SÉNÉGAS**, Professeur des Universités

M. **Murat YILDIZOĞLU**, Professeur des Universités

Soutenue le 11 décembre 2012

**Jury :**

**M. Paul de GRAUWE**

Professeur, London School of Economics, **rapporiteur**

**M. Cars H. HOMMES**

Professeur, School of Economics, Université d’Amsterdam, **rapporiteur**

**M. Jean-Christophe PEREAU**

Professeur, Université Montesquieu - Bordeaux IV

**M. Marc-Alexandre SÉNÉGAS**

Professeur, Université Montesquieu - Bordeaux IV, **co-directeur de thèse**

**M. Thomas VALLÉE**

Professeur, Université de Nantes

**M. Jouko VILMUNEN**

Head of Research, Research Unit, Bank of Finland

**M. Murat YILDIZOĞLU**

Professeur, Université Montesquieu - Bordeaux IV, **co-directeur de thèse**



L’Université n’entend ni approuver, ni désapprouver les opinions particulières émises dans cette thèse. Ces opinions sont considérées comme propres à leur auteur.



---

## Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mes deux directeurs de thèse, Murat Yıldızoglu et Marc-Alexandre Sénégas, d'abord pour avoir eu l'initiative de ce groupe de travail autour de l'application de la modélisation multi-agents aux thématiques macroéconomiques, ensuite pour l'avoir fait vivre et m'avoir ainsi permis de mener à bien ce travail. A ce titre, je remercie aussi Martin Zumpe pour sa participation. J'ai beaucoup appris de nos séances de travail, de nos échanges, de nos discussions, de leurs critiques et de leurs conseils au cours de ces dernières années, et je les remercie d'avoir eu la patience de travailler avec moi. Je tiens aussi à remercier particulièrement Murat pour m'avoir intéressée et initiée à la programmation informatique.

Je remercie également les membres de mon jury pour avoir accepté d'y participer et de contribuer ainsi à une évaluation fructueuse de cette thèse.

Mes recherches bénéficient aussi beaucoup de synergies permises par la rencontre avec d'autres chercheurs, en particulier Jasmina Arifovic, Camille Cornand, Jean-Christophe Poutineau et Pascal Seppecher. Le soutien financier du laboratoire GREThA et de l'école doctorale Entreprises, Economie et Société m'a été précieux, en rendant ces échanges possibles.

Les remarques de deux rapporteurs anonymes de la *Revue d'Economie Politique*, de deux rapporteurs anonymes de *Macroeconomic Dynamics* et d'un rapporteur anonyme d'*Economic Modelling* ont sans nul doute contribué à enrichir et à améliorer mon travail.

Pour finir, l'expertise mathématique de Roger Di Costanzo, les corrections orthographiques de Raymonde Viboud ainsi que l'aide à la rédaction de la version anglaise de cette thèse d'Audrey Salle et de Ray Godfrey ont été particulièrement appréciées.



*« An organism in equilibrium is dead. »*

Stuart Alan Kauffman, biologiste, spécialiste des systèmes complexes.



# Sommaire

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Ciblage de l’Inflation, Transparence et Anticipations</b>	<b>11</b>
<b>2 Construction du Modèle à Base d’Agents</b>	<b>47</b>
<b>3 Le Ciblage de l’Inflation dans une Economie sous Apprentissage</b>	<b>111</b>
<b>4 Dynamique des anticipations, apprentissage et ciblage</b>	<b>167</b>
<b>Conclusion générale</b>	<b>235</b>
<b>A Annexes au chapitre 1</b>	<b>239</b>
<b>B Annexes au chapitre 2</b>	<b>249</b>
<b>C Annexes au chapitre 3</b>	<b>265</b>
<b>D Annexes au chapitre 4</b>	<b>281</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>297</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>315</b>
<b>Liste des illustrations</b>	<b>317</b>
<b>Liste des encadrés</b>	<b>321</b>
<b>Table des matières</b>	<b>323</b>



# Introduction générale

**L**E 18 NOVEMBRE 2010, à Francfort, Jean-Claude Trichet prononce le discours d'ouverture de la conférence intitulée "Approches de la politique monétaire revisitées : leçons tirées de la crise" qui se tient à la Banque Centrale Européenne, dont il est alors le gouverneur. A cette occasion, il entend dresser un bilan préliminaire des conséquences de la crise actuelle sur l'analyse économique. Sur ce point, il commence ainsi :

*"When the crisis came, the serious limitations of existing economic and financial models immediately became apparent. Macro models failed to predict the crisis and seemed incapable of explaining what was happening to the economy in a convincing manner. [...] The key lesson I would draw from our experience is the danger of relying on a single tool, methodology or paradigm."*

Le paradigme auquel fait référence l'ancien gouverneur est le cadre d'analyse macroéconomique vers lequel ont convergé les avancées des travaux académiques ces vingt dernières années. Ce cadre d'analyse s'articule autour d'une pierre angulaire concernant la conduite de la politique monétaire, qui peut être résumée ainsi. Les autorités monétaires déterminent le taux d'inflation à moyen terme, tout en exerçant un pouvoir stabilisateur conjoncturel, en arbitrant entre volatilité de l'inflation et volatilité de l'écart de production. Cet arbitrage est le fruit des rigidités temporaires qui existent dans l'ajustement des prix, des salaires et des anticipations les concernant. Par ailleurs, il existe des délais de transmission inévitables des actions de politique monétaire à l'économie réelle et la banque centrale agit dans un environnement incertain : incertitude sur le niveau et la mesure des variables pertinentes, incertitude sur les anticipations des agents, incertitude sur le modèle sous-jacent de l'économie, ... Dans ce contexte, les anticipations à la fois des autorités monétaires et du public sont projetées au centre de l'analyse et les banques centrales sont décrites comme des "*managers* d'anticipations". La monographie de Woodford (2003b) constitue le point d'orgue de ce cadre d'analyse, dont les racines sont à chercher dans les développements, depuis l'après-guerre, issus d'écoles de pensée très différentes.

Déjà l'analyse keynésienne avait fait une large place aux anticipations tout en insistant sur la difficulté d'en identifier les déterminants. Robinson (1979, p. 153) écrit : *"Past experience is no doubt the major element in expectations but [...] compounded in the market with a variety of theories and superstitions and the whole amalgam is played upon from day to day by the influences (including the last bank chairman's speech) which make up what Keynes called the "state of the news".* La stagflation des années 1970 pousse à la remise en cause des hypothèses Keynésiennes, en particulier celle de

l'existence d'un arbitrage entre le niveau de l'inflation et celui du chômage. En réponse, l'avènement des thèses monétaristes impose l'idée que la politique monétaire seule peut lutter contre l'inflation et fait de la stabilité des prix l'objectif prioritaire du mandat des banques centrales. L'intervention des autorités monétaires s'en trouve réduite à une règle de croissance de la masse monétaire fixe et publiquement annoncée garantissant la stabilité des prix (Friedman (1968)). La fiabilité des modèles macroéconométriques issus de l'analyse Keynésienne se trouve également remise en cause (Lucas (1976, 1980)). La recherche académique s'attèle alors à établir des modèles plus robustes aux changements de l'environnement économique dans lequel ils sont utilisés. L'école des Nouveaux Classiques (Lucas (1972), Sargent & Wallace (1975), Kydland & Prescott (1982)) oriente l'analyse macroéconomique vers la recherche de fondements microéconomiques. Les modèles de cycles réels qui en résultent sont dits microfondés, dans le sens où la dynamique macroéconomique est obtenue par l'agrégation du comportement microéconomique d'un agent, représentatif, qui adopte un comportement optimal, compte tenu des contraintes auxquelles il fait face. En conséquence, les paramètres de ces modèles sont structurels, puisqu'ils se fondent sur les préférences individuelles de l'agent représentatif, contrairement à ceux des modèles Keynésiens, issus de l'estimation d'équations agrégées *ad hoc*, sensibles aux données utilisées. Deux hypothèses sont mises en avant dans ce cadre d'analyse : l'hypothèse d'*anticipations rationnelles*, au sens de Muth (1961), c'est-à-dire cohérentes avec le modèle sous-jacent de l'économie, et celle de taux d'intérêt naturel exogène. Les marchés sont en concurrence parfaite et apurés en permanence par les prix, supposés parfaitement flexibles. Les fluctuations de la conjoncture économique sont alors imputées à des chocs réels exogènes. Ce courant de pensée conclut donc à l'impuissance de la politique monétaire sur les variables réelles, niant ainsi sa fonction de stabilisation conjoncturelle.

Pourtant, dès la fin des années 1970, on assiste à un regain d'intérêt pour des éléments issus, de près ou de loin, de la pensée de Keynes, appuyé par la situation économique (Tobin (1977)) : récession en Europe et aux Etats-Unis après 1979, stagnation et persistance d'un chômage élevé en Europe dans les années 1980 malgré la mise en oeuvre de politiques anti-Keynésiennes. C'est en introduisant dans les modèles de cycles réels des hypothèses de filiation Keynésienne – rigidités des prix, prépondérance de la demande dans la détermination de la production anticipée – ainsi qu'un cadre de concurrence imparfaite issu des travaux pionniers de Dixit & Stiglitz (1977) ou Blanchard & Kiyotaki (1987) que le courant Nouveau Keynésien réhabilite la fonction stabilisatrice de la politique monétaire. Les premières tentatives se trouvent dans les travaux de Phelps et Taylor, qui posent les prémisses des caractéristiques modernes de la théorisation de l'action des banques centrales (Phelps (1967), Taylor (1975, 1979), Phelps & Taylor (1977)). Ainsi, la réunion des courants Nouveau Classique et Nouveau Keynésien donne lieu à ce que Goodfriend & King (1997) définissent comme la *Nouvelle Synthèse Néoclassique* et

leurs modèles sont couramment désignés sous le nom de *modèles dynamiques stochastiques d'équilibre général* (DSGE). Ils constituent aujourd'hui le cadre d'analyse macroéconomique de référence, aussi bien dans les milieux académiques que dans les banques centrales. C'est à eux et à cette synthèse dont ils sont issus que Jean-Claude Trichet fait référence en tant que paradigme dans la citation ci-dessus.

Ces modèles ont l'avantage de constituer un cadre d'analyse cohérent et unifié. Ce sont des outils puissants et analytiquement très sophistiqués. Ils ont permis d'étudier les liens entre monnaie, inflation et cycles des affaires et d'évaluer les conséquences de la mise en place de différentes règles de politique monétaire. Ils ont ainsi été capables d'identifier les propriétés désirables des règles et d'aider à la conception de règles optimales. Par ailleurs, le succès de ce cadre d'analyse s'explique sans doute aussi en partie par le contexte macroéconomique particulièrement favorable pendant lequel il s'est imposé. Les deux dernières décennies ont été caractérisées, dans le monde développé, par une stabilité macroéconomique, accompagnée d'une inflation faible et d'une croissance économique soutenue. Une large part des économistes jugeait ces performances, au moins en partie, imputables aux progrès de la théorie macroéconomique et aux outils – dont les modèles DSGE sont les produits les plus aboutis – qu'ils ont permis de développer (Lucas (2003)), ainsi qu'au rapprochement entre la théorie et la pratique dans la conduite de la politique monétaire (Clarida et al. (1999)). Or, cette période dite de *grande modération* a brutalement pris fin avec la crise financière de 2007 et le consensus dont elle avait permis l'émergence se trouve attaqué. Ainsi, Jean-Claude Trichet poursuit son discours et indique trois voies de recherche qui, bien que négligées jusque là par la littérature macroéconomique, lui semble prometteuses :

*"We do not need to throw out our DSGE and asset-pricing models : rather we need to develop complementary tools to improve the robustness of our overall framework. First, [...] the atomistic, optimising agents underlying existing models do not capture behaviour during a crisis period. We need to deal better with heterogeneity across agents and the interaction among those heterogeneous agents. [...] Agent-based modelling dispenses with the optimisation assumption and allows for more complex interactions between agents. Second, we may need to consider a richer characterisation of expectation formation. There is a clear need to re-examine [the assumption of rational expectations]. Very encouraging work is under way on new concepts, such as learning and rational inattention. Third, we need to better integrate the crucial role played by the financial system into our macroeconomic models.*

La nécessité d'une modélisation plus riche de l'hétérogénéité des agents et de la formation de leurs anticipations fait écho à la critique méthodologique dont sont l'objet les modèles DSGE, qui visent

les hypothèses fondamentales nécessaires à leur dérivation (Colander (2006), Miller (2009), Delli Gatti et al. (2010), Howitt (2012), De Grauwe (2012), Dosi (2012) entre autres). D'une part, les modèles standards postulent que les comportements microéconomiques peuvent être résumés par le comportement d'un agent représentatif, doté des caractéristiques de la population entière. Les problèmes de coordination et d'agrégation des comportements individuels vers une dynamique macroéconomique sont ainsi évacués par hypothèse. D'autre part, cet agent représentatif est supposé être doté de capacités cognitives très sophistiquées – Simon (1955) parle de rationalité substantive – et avoir accès à une information complète : il connaît et comprend parfaitement le modèle sous-jacent de l'économie, sa forme ainsi que la distribution de ses paramètres. Couplé à l'hypothèse d'anticipations rationnelles, ceci lui permet d'utiliser la structure du modèle de l'économie pour prendre ses décisions économiques et prévoir l'évolution des variables pertinentes à ses décisions : il est alors toujours capable d'identifier et de mettre en oeuvre la décision optimale, compte tenu de ses contraintes et de l'état de l'environnement. Ces hypothèses sont inhérentes aux modèles DSGE car elles sont nécessaires à leur dérivation analytique. Les travaux issus de la psychologie ou de la neurologie tendent pourtant à démontrer que ces hypothèses ne sont pas plausibles (voir notamment Kahneman & Tversky (1974), Simon (1996), Kahneman (2003)). En général, les individus ne sont pas capables d'intégrer toute la complexité des informations qu'ils reçoivent et de déterminer sur cette base la décision optimale. Ils utilisent plutôt des règles simples, des *heuristiques*, pour guider leurs comportements, d'une manière adaptative, vers l'accomplissement de leur objectif (Simon (1971)).

Alors que d'autres champs de la science économique, comme la théorie des jeux ou l'économie expérimentale, ont reconnu l'intérêt de mettre en cause ces hypothèses, notamment l'hypothèse d'anticipations rationnelles, la macroéconomie est restée relativement immune à ces développements. La littérature sur l'apprentissage économétrique dans les modèles macroéconomiques, initiée par Sargent (1993), Evans & Honkapohja (2001) et Bullard & Mitra (2002) constitue certes une exception. Néanmoins, elle ne modélise qu'une déviation mineure par rapport au cadre standard : les agents sont tout de même supposés connaître la forme du modèle sous-jacent de l'économie, et l'utiliser pour former leurs anticipations. Surtout, cette littérature n'a eu que peu d'applications dans les modèles DSGE (De Grauwe (2012)). Cette lacune est d'autant plus surprenante que les anticipations jouent un rôle primordial dans l'étude des dynamiques macroéconomiques, et de la politique monétaire en particulier. Boivin (2011, p. 2), sous-gouverneur de la Banque du Canada explique très bien pourquoi : "Les résultats économiques découlent des décisions collectives des gens, et ces décisions dépendent du mode de pensée des gens et de ce qu'ils anticipent pour l'avenir. L'incertitude est inhérente à l'avenir. [...] Entreprises, particuliers, familles ou autorités monétaires : nous formons tous des suppositions éclairées,

*ou anticipations, à propos d'événements dont nous sommes incertains. Cela signifie que les résultats économiques actuels sont déterminés par ce que les gens pensent de l'avenir, et pas nécessairement par ce que l'avenir sera réellement.*" Réciproquement, ce que les gens pensent de l'orientation future de la politique monétaire influence leurs décisions et peut avoir une grande incidence aujourd'hui. La gestion des anticipations – ou canal des anticipations – est donc un outil puissant par lequel la politique monétaire peut stabiliser l'économie.

Dans ce contexte, comprendre et parvenir à modéliser la manière dont les agents forment leurs anticipations est déterminant. Sur ce point, les anticipations rationnelles constituent un départ utile et ont permis d'ancrer deux idées fortes : les anticipations des agents ont des conséquences sur leurs actions et ils adaptent leurs comportements à l'évolution de l'environnement. Cependant, comme le souligne Boivin (2011), l'hypothèse d'anticipations rationnelles banalise le processus décisionnel et écarte des éléments qui ont le potentiel d'infirmer d'importantes recommandations de mesures de politique monétaire. Ces éléments sont les biais inconscients qui guident nos modes de pensée et nous amènent, par exemple, à occulter une partie de l'information, à mal évaluer l'incertitude, à extrapoler mécaniquement les jugements actuels vers le futur ou encore à être soumis à des comportements moutonniers. Toutes ces dimensions ne sont pas systématiquement intégrées à l'hypothèse d'anticipations, bien qu'elles puissent avoir des implications notables pour la politique monétaire.

On pourrait néanmoins défendre ces hypothèses comportementales peu plausibles avec l'argument du "as if" de M. Friedman, si la validation empirique des modèles DSGE n'était pas, elle aussi, contestable. En effet, une seconde critique de ces modèles tient à leur représentation du cycle des affaires. L'objet d'intérêt dans ces modèles se trouve dans la capacité de la banque centrale à contrecarrer les déviations du modèle vis-à-vis de l'équilibre. Or, ces déviations sont introduites de manière purement exogène dans le système, sans que rien ne permette d'en expliquer l'origine (De Grauwe (2012)).

Comme le laisse sous-entendre son titre *Apprentissage, Hétérogénéité et Politique Monétaire*, cette thèse a pour ambition d'explorer les deux premières voies citées par J.-C. Trichet : la prise en compte des interactions d'agents hétérogènes et la modélisation plus riche de leurs anticipations. Nous nous focalisons sur l'analyse des interactions entre les processus individuels d'apprentissage d'un grand nombre d'agents hétérogènes et les performances macroéconomiques de la politique monétaire. Le travail de thèse retient par ailleurs le cadre d'un régime de *ciblage de l'inflation*. Il s'agit d'un dispositif de conduite de la politique monétaire dans lequel la banque centrale annonce publiquement sa cible d'inflation et s'engage à mener une politique très transparente concernant les objectifs, les moyens mis en oeuvre pour les atteindre, le processus de prises de décision au sein de la banque centrale et l'analyse macroéconomique qui les sous-tend. Ces régimes ont connu un succès croissant depuis ces

vingt dernières années et ont ainsi reçu une attention particulière dans la littérature (voir par exemple les travaux de L. Svensson). L'annonce de la cible d'inflation est généralement justifiée par le besoin de fournir un point de référence pour l'évaluation de la politique monétaire ainsi qu'un point focal pour permettre la coordination des anticipations d'inflation du public. La politique de transparence associée doit permettre de rendre la politique davantage compréhensible et prédictible pour les agents privés. Ces éléments sont susceptibles de se voir donner une justification renforcée dans un contexte où les questions d'hétérogénéité et de dynamiques d'apprentissage sont incluses. Ainsi, M. King, gouverneur de la Banque d'Angleterre, qui a adopté un régime de ciblage de l'inflation, parle de ce régime comme d'un "*framework designed for a world of learning*" (King (2005, p. 14)).

Le modèle que nous développons décrit une économie en régime de ciblage de l'inflation, dans laquelle les agents sont hétérogènes, tant dans leurs dotations, que dans leurs décisions et leurs anticipations et interagissent sans connaître toute l'information pertinente à leurs prises de décisions. Ils font face à des limites cognitives, qui les empêchent de comprendre l'ensemble du modèle de l'économie, de calculer une distribution de probabilité sur l'ensemble des états du monde possibles et de prendre la décision optimale compte tenu de ces informations et de leurs contraintes. En d'autres termes, ces agents sont dotés d'une rationalité procédurale au sens de Simon (1976) et utilisent de simples heuristiques pour guider leurs comportements, qu'ils révisent par un mécanisme d'apprentissage perpétuel. Une telle représentation de l'économie est rendue possible en mobilisant une modélisation en termes de systèmes complexes (voir par exemple Tesfatsion & Judd (2006) ou Miller & Page (2007)). En effet, ce type de modèles convient particulièrement bien à notre problématique de recherche. Il a été développé pour étudier l'émergence de propriétés agrégées à partir de l'interaction des comportements individuels des agents.

Une représentation de l'économie comme un système complexe peut être obtenue avec un modèle macroéconomique à base d'agents. D'une manière très générale, un tel modèle consiste en une économie artificielle simulée, dans laquelle des agents hétérogènes interagissent de manière répétée selon des heuristiques, c'est-à-dire des règles prescrites non-optimisées. Il s'agit d'une économie décentralisée, dans laquelle la dynamique macroéconomique émerge des interactions microéconomiques, résolvant ainsi les questions d'agrégation (Tesfatsion (2006a)). En conséquence, les modèles à base d'agents possèdent des bases microéconomiques, tout comme les modèles DSGE, et sont donc robustes à la critique de Lucas (1976). L'approche computationnelle présente l'avantage de laisser au modélisateur une grande latitude dans la conception des processus d'apprentissage. Elle permet de s'affranchir des hypothèses nécessaires à l'obtention d'une solution analytique, puisque les résultats sont obtenus par simulations informatiques. Il est par exemple possible d'observer des dynamiques non-linéaires de

l'économie, évoluant en dehors d'un équilibre prédéfini. Les décisions et les anticipations des individus peuvent devenir mutuellement compatibles, en résultat du processus d'apprentissage, mais ce n'est pas un prérequis de la modélisation. Il se peut que les marchés ne s'apurent pas, notamment qu'il y ait du chômage involontaire. Ce type d'approche s'est montré très prometteur, en permettant notamment l'émergence, de manière endogène, de cycles des affaires, sans l'introduction de chocs exogènes comme c'est le cas dans les modèles DSGE.

Il ne s'agit pas pour autant ici de délivrer un substitut à la modélisation dominante, nous n'avons pas non plus la prétention de démontrer la supériorité d'une approche vis-à-vis d'une autre. Nous ambitionnons plutôt de montrer comment il est possible de développer un cadre d'analyse où l'on peut s'abstraire des hypothèses les plus fortes, nécessaires à la construction des modèles Nouveaux Keynésiens – c'est-à-dire anticipations rationnelles, agent représentatif et information parfaite – tout en délivrant un modèle et des résultats cohérents.

Les modèles computationnels à base d'agents sont très répandus dans d'autres champs scientifiques, tels que la biologie, la neurologie, la logistique, la climatologie. En économie, ces modèles sont issus de l'étude de la dynamique industrielle par l'économie dite *évolutionniste*. Les travaux de Nelson & Winter (1982) peuvent être considérés comme les pionniers de cette branche de l'analyse économique, dont les racines se trouvent pour partie dans les réflexions de K. J. Cohen, R. M. Cyert et J. G. March (voir, par exemple, Cohen (1960) et Cyert & March (1963)). Un des premiers modèles à base d'agents qui se développent en dehors de cet objet d'étude est le modèle ASM (Artificial Stock Market) de Santa Fe (LeBaron (2002)). En macroéconomie, et pour l'analyse de la politique monétaire en particulier, leur utilisation est plutôt marginale. Nous relevons à cet égard les travaux de Brunn (1997, 2007), le projet EURACE (Deissenberg et al. (2008)), les travaux de Raberto et al. (2007, 2008, 2010), la thèse de doctorat de Oeffner (2008), les contributions de Delli Gatti et al. (2005), Gaffeo et al. (2008), de Mandel et al. (2010), de Lengnick (2011) et Lengnick & Wohltmann (2012), et de Seppecher (2010, 2012). A notre connaissance, aucun de ces apports ne porte sur l'analyse des régimes de ciblage de l'inflation.

Via l'utilisation d'une approche à base d'agents, le travail de thèse emprunte à des disciplines voisines, notamment les sciences de l'ingénieur et de l'informatique. La modélisation utilisée mobilise plusieurs algorithmes et méthodes issus de ces sciences (algorithmes génétiques, réseaux de neurones artificiels, méthode des plans d'expériences, métamodélisation par krigeage). Il s'agit d'une des originalités du travail de thèse. Nous dévouons alors un soin particulier à l'explication des fondements et de l'application de ces éléments à un modèle économique. La première contribution de cette thèse est

sans contester un apport méthodologique. Elle montre qu'il est possible de créer un modèle macroéconomique dont la structure ne diffère que de peu de celles de modèles DSGE, tout en permettant de modéliser une collection d'agents hétérogènes en interactions, engagés dans un processus d'apprentissage perpétuel. En particulier, tout comme dans les modèles Nouveaux Keynésiens de base, la politique monétaire passe par deux canaux : celui de la consommation et celui des anticipations et les informations de la banque centrale sont explicitement incluses dans le mécanisme de formation des anticipations des agents. A notre connaissance, il s'agit du premier modèle macroéconomique computationnel de ce type.

Le premier chapitre de la thèse passe en revue la manière dont la littérature a modélisé les régimes de ciblage de l'inflation et leurs propriétés, en relâchant progressivement les hypothèses d'homogénéité des agents et d'anticipations rationnelles. Cette revue introduit ainsi naturellement les caractéristiques principales du modèle que nous construisons par la suite.

Grâce aux apports d'autres disciplines, le chapitre 2 de la thèse détaille ensuite une méthode rigoureuse de construction et de validation d'un modèle macroéconomique à base d'agents. S'appuyant ensuite sur le parallèle avec le modèle Nouveau Keynésien de base, ce chapitre propose un modèle à base d'agents pour l'analyse du ciblage d'inflation.

Le chapitre 3 franchit l'étape de validation, nécessaire pour établir la crédibilité des résultats dérivés dans la suite. En effet, s'écartez du paradigme de l'agent représentatif rationnel et maximisateur n'est pas chose aisée. Alors que les anticipations rationnelles fournissent un concept précis, il n'y a pas de consensus sur la manière de modéliser un comportement de rationalité limitée ou d'apprentissage et la formalisation de règles heuristiques peut paraître *ad hoc*. Nous avons alors besoin d'éléments disciplinant la spécification du modèle et la phase de validation permet de s'assurer de leur cohérence. Nous vérifions en particulier le bon fonctionnement des canaux de transmission de la politique monétaire et justifions la valeur des paramètres du modèle que nous fixons. L'approche que nous utilisons a été développée en partie dans la thèse de doctorat d'Oeffner (2008). Nous l'appliquons ici à un modèle dévoué à l'analyse des questions de politique monétaire et des régimes de ciblage de l'inflation en particulier. Le chapitre se conclut par une première analyse de l'influence des anticipations d'inflation sur les performances macroéconomiques dans le modèle à base d'agents. Cette analyse montre en particulier qu'introduire de l'hétérogénéité, tant dans les comportements que dans les anticipations des agents, produit de manière endogène de la variabilité au niveau macroéconomique et complique la stabilisation de l'économie par la banque centrale. L'analyse souligne aussi le rôle primordial de la crédibilité de la cible d'inflation dans l'ancrage des anticipations, et par là dans la réalisation des objectifs de la banque centrale.

Le dernier chapitre fournit enfin des apports normatifs en envisageant le rôle de l'annonce d'une cible d'inflation puis d'une politique de transparence plus complète sur la stabilisation macroéconomique. Notre modèle nous fournit un laboratoire dans lequel nous pouvons évaluer comment les processus d'apprentissage affectent les propriétés des dynamiques macroéconomiques et leur évolution. Il nous permet de revisiter les résultats établis par la littérature macroéconomique standard, pour en améliorer la robustesse. Ainsi, nos résultats réaffirment l'influence prépondérante du canal des anticipations dans la réussite de la politique monétaire. Ils tendent à démontrer que l'annonce d'une cible d'inflation permet d'améliorer significativement la stabilisation de l'inflation, dès que la spécification d'un mécanisme de formation des anticipations d'inflation prospectif est permise. Cependant, ce résultat n'est pas valable en considérant une spécification myope et mécanique des anticipations. Nous contribuons aussi au débat sur le degré de transparence optimale initié par Morris & Shin (2002). Nous concluons en faveur d'une transparence forte, incluant notamment la publication des projections de taux d'intérêt et des prévisions macroéconomiques. En ce sens, notre travail de thèse s'inscrit dans la vaste littérature liant apprentissage et politique monétaire, qui tend à réhabiliter le bénéfice de davantage de transparence. Certains résultats de la littérature se trouvent par ailleurs infirmés par notre travail. C'est le cas de la nécessité du principe de Taylor, qui prescrit une réaction de l'instrument de politique monétaire plus que proportionnelle aux déviations de l'inflation à sa cible. Une politique de transparence accrue, qui joue en retour sur des anticipations prospectives, permet de stabiliser l'économie au prix d'une agressivité moindre de la règle. Là encore, ce résultat n'est pas maintenu si on retient un mécanisme purement adaptatif des anticipations. Dans ce cas, nous concluons à l'optimalité de règles agressives, dans le sillon des conclusions de la littérature étudiant la robustesse des règles en milieu incertain, initié par les travaux de Brainard (1967).

Une conclusion forte qui ressort de l'ensemble de ce travail de thèse est la nécessité d'intégrer dans la modélisation et l'analyse normative de la politique monétaire l'effet de l'apprentissage sur la transmission de la politique monétaire et sur l'efficacité des règles et de la communication de la banque centrale.



## CHAPITRE 1

# Ciblage de l’Inflation, Transparence et Anticipations : une revue de la littérature récente

---

## Sommaire

---

Introduction . . . . .	13
I      Le ciblage de l’inflation : une règle ? . . . . .	15
II     Pourquoi et comment la transparence induit des effets économiques . . . . .	21
III    Transparence, asymétrie d’informations et ciblage de l’inflation . . . . .	24
III.1   Coordonner les anticipations d’inflation par l’annonce d’une cible . . . . .	25
III.2   Réduire l’incertitude par la publication des prévisions de la banque centrale	28
IV    La transparence dans un contexte d’apprentissage . . . . .	36
IV.1   Faciliter l’apprentissage des agents grâce à un régime de ciblage de l’inflation . . . . .	36
IV.2   Le ciblage de l’inflation comme une routine . . . . .	40
Conclusion . . . . .	44

---

## Introduction

**J**USQU'AU début des années 1990, les banques centrales conduisaient la politique monétaire dans une tradition de secret et d'opacité (Goodfriend (1986), Geider (1989)). Pour rendre compte de cet état des faits, la littérature académique avait recours à des modèles où la politique monétaire exerçait des effets sur l'économie *via* l'inflation non-anticipée. Il s'agissait alors pour les autorités monétaires de surprendre le public. Une série de publications montrant l'effet à court terme sur l'économie de la politique monétaire ainsi que la sophistication des modèles théoriques permettant son analyse amorcent un renouveau sur la manière dont la politique monétaire doit être menée (Goodfriend & King (1997), Clarida et al. (1999)). La synthèse Nouvelle Keynésienne fait des anticipations des agents et de la banque centrale un enjeu majeur de la politique monétaire (Woodford (2003b)). Ainsi, Woodford (2005) écrit : "*Not only do expectations about policy matter, but [...] very little else matters*". Les autorités monétaires sont décrites comme des "managers d'anticipations". Pour influencer ces anticipations, la conduite de la politique monétaire doit être rendue plus transparente, ce qui correspond à la direction prise par l'ensemble des banques centrales ces dernières années (Geraats (2009)).

Dans ce contexte, les régimes de ciblage de l'inflation ont connu un succès croissant<sup>1</sup>. En 2009, on dénombrait 26 pays (11 pays développés et 15 pays émergents) ayant adopté un tel régime, dans la lignée de la Nouvelle Zélande qui le met en place dès 1989. Il est cependant difficile de s'accorder sur une définition claire des régimes de ciblage de l'inflation, comme en témoignent les premiers travaux à leur sujet menés sous la forme d'études de cas<sup>2</sup>. Ils ont en effet une origine largement pragmatique (Svensson (2002)) mais, d'une manière générale, ils apparaissent comme des cadres privilégiés pour mettre en oeuvre cette volonté de transparence (Orphanides (2009)). La transparence désigne une situation où la banque centrale révèle au public ses informations privées (Geraats (2002)). La transparence peut concerner tous les domaines de la politique monétaire (voir Geraats (2002) ou Minegishi & Cournède (2009) pour des exemples de classification) : il ne s'agit pas uniquement de la transparence sur les objectifs (en annonçant une cible d'inflation notamment), il s'agit aussi de la transparence sur les décisions de politique monétaire et l'analyse macroéconomique qui les sous-tend (par notamment la publication des prévisions de taux d'intérêt, d'inflation, d'écart de production ou de chocs par la banque centrale). Orphanides & Williams (2007) soulignent à cet égard plusieurs caractéristiques du ciblage de l'inflation : i) l'annonce d'une cible explicite d'inflation et la priorité donnée à la stabilité des prix, ii) une place primordiale accordée aux anticipations des agents et de la banque centrale, iii) une stratégie

1. Voir par exemple Batini & Laxton (2007), Thornton (2009), Schmidt-Hebbel (2009), Roger (2009), Walsh (2009), Svensson (2010) pour des revues récentes de l'expérience des régimes de ciblage de l'inflation.

2. Voir par exemple McCallum (1998), Bernanke & Mishkin (1997), Bernanke et al. (1999), Neumann & von Hagen (2002), Roger & Stone (2005).

de communication claire entre la banque centrale et le public qui assure la responsabilisation de la banque centrale et la prédictibilité des décisions de politique monétaire. Le dernier point souligne que la transparence fait partie intégrante des régimes de ciblage de l’inflation (Faust & Henderson (2004)). Elle n’est pas seulement la contrepartie démocratique d’une banque centrale indépendante, elle exerce aussi des effets économiques. Ces effets sont doubles : l’effet incitatif engage la banque centrale sur la poursuite d’une inflation faible et l’effet d’information permet d’agir sur les anticipations des agents et en retour sur la dynamique macroéconomique (Geraats (2009)).

Le principal enjeu théorique est de parvenir à modéliser les régimes de ciblage d’inflation, bien qu’ils soient d’origine empirique, pour dégager le rôle de la transparence dans leurs performances. Ce chapitre a pour but d’examiner comment la littérature théorique a relevé ce défi. Bien que d’autres contributions aient déjà recensé les effets économiques de la transparence en général, tant sur le plan analytique qu’empirique (voir par exemple Geraats (2002, 2009), Eijffinger & van der Cruijsen (2007), Blinder et al. (2008)), nous nous focalisons dans ce chapitre sur les modélisations qui se placent dans le cadre des régimes de ciblage de l’inflation. L’objectif est d’identifier les enjeux particuliers associés à la transparence du point de vue des performances et du fonctionnement de ces régimes. Il existe certes déjà d’excellentes revues sur le thème des régimes de ciblage de l’inflation (comme notamment Svensson (2010)) mais notre travail insiste sur l’évolution des représentations théoriques. Il démontre en particulier comment la modélisation a successivement appréhendé les effets de ces régimes, fournissant ainsi des explications à leur succès empirique. Bien que le chapitre soit ponctué de références à la vaste littérature empirique qui s’est attachée à évaluer les performances macroéconomiques des régimes de ciblage de l’inflation, nous nous concentrons sur les travaux d’ordre théorique. Nous mettons un accent particulier sur les contributions très récentes qui ont permis de réhabiliter le rôle parfois contesté d’une transparence renforcée en faisant appel à la littérature liant apprentissage et politique monétaire. L’annexe A.1, page 247 classe les principales contributions mentionnées dans le présent chapitre. Nous montrons l’évolution de la littérature. Celle-ci s’inscrit dans deux vagues successives. Dans la section I, nous abordons la première vague, qui contient les modélisations du ciblage en tant que dispositif d’engagement sur une règle permettant la responsabilisation des autorités monétaires. Dans la deuxième section, nous introduisons les considérations générales sur les effets directs potentiels de la transparence qui ont guidé la seconde vague. La section III développe alors le cadre des jeux de coordination et des modèles *forward-looking* dans lesquelles l’asymétrie d’informations entre le public et la banque centrale confère à cette dernière la possibilité d’influencer les anticipations des agents par la transparence . Dans la section IV, nous exposons la littérature récente, mais en pleine expansion, utilisant des modèles d’apprentissage pour fonder le rôle de la transparence.

## I Le ciblage de l'inflation : une règle ?

Entre les années 1970 et 1990, la littérature sur la politique monétaire s'inscrit principalement dans le courant de la nouvelle économie classique. Deux hypothèses principales – l'hypothèse d'anticipations rationnelles et celle de taux naturel – amènent cette littérature à se concentrer sur les questions d'*incohérence temporelle* et le manque de *crédibilité* des annonces des responsables de la politique économique, et de la politique monétaire en particulier (Kydland & Prescott (1977), Barro & Gordon (1983a,b)). Il en résulte le fameux *biais inflationniste* associé à la conduite de la politique monétaire discrétionnaire. La littérature se focalise alors sur les solutions pour limiter ce biais. Les modélisations des régimes de ciblage de l'inflation découlent d'abord de ce débat (Svensson (1999))<sup>3</sup>.

Dans le même temps, depuis la contribution séminale de Taylor (1993), de nombreux travaux ont été publiés sur les règles de politique monétaire (Clarida et al. (1999), Svensson (2003), Woodford (2003b)). Les régimes de ciblage de l'inflation ont alors naturellement été appréhendés comme tels (voir Kuttner (2004) pour une revue détaillée de ce point). Cette section a pour but de lier ces deux littératures et de montrer comment elles ont abordé le ciblage de l'inflation.

Le ciblage de l'inflation peut être interprété comme une règle de trois manières différentes (Kuttner (2004)). Dans sa forme la plus générale, il peut être décrit comme une règle de politique monétaire – ou fonction de réaction – qui permet de fixer le taux d'intérêt nominal  $i_t$  en fonction de l'écart du taux d'inflation courant  $\pi_t$  à sa cible  $\pi^T$ . En pratique, le ciblage de l'inflation est dit *flexible* (au sens de Svensson (1997a)) car la fonction de réaction tient aussi compte de l'activité économique. Une simple règle *ad-hoc* – ou dite *instrumentale* – du type de celle proposée par Taylor (1993) permet ainsi de décrire un régime de ciblage de l'inflation :

$$i_t = r^* + \pi^T + 0.5x_t + 1.5(\pi_t - \pi^T) \quad (1.1)$$

avec  $r^*$  le taux d'intérêt naturel (ou de long terme) et  $x_t$  l'écart de production. Par exemple, Gali (2002) définit ce régime ainsi dans le cadre d'analyse Nouveau Keynésien.

Une définition plus exigeante du ciblage de l'inflation requiert que la règle soit optimale, dans le sens où elle fixe le taux d'intérêt de manière à minimiser une fonction de perte de la banque centrale. C'est l'interprétation retenue par Svensson (1997a, 1999). Dans un modèle macroéconométrique, Rudebusch & Svensson (1999) montrent que, sur un plan empirique, ce type de règles traduit de manière satisfaisante la politique des banques centrales en ciblage. Supposons que la banque centrale cherche

---

3. Ce pan de la littérature a été extensivement développé, c'est pourquoi nous n'insistons pas sur sa modélisation dans le corps de ce chapitre mais la reléguons à l'annexe I.1, page 241.

à minimiser une fonction de perte intertemporelle de la forme :

$$E_t \sum_{\tau=t}^{\infty} \delta^{\tau-t} L_{\lambda}(\pi_{\tau}, x_{\tau}) \quad (1.2)$$

où  $\delta \in ]0, 1[$  est un facteur d’actualisation et la fonction de perte chaque période peut s’écrire :

$$\mathcal{L}_{\lambda}(\pi_t, x_t) = \frac{1}{2} ((\pi_t - \pi^T)^2 + \lambda x_t^2) \quad (1.3)$$

où  $\lambda \geq 0$  est le poids relatif placé sur la stabilisation de l’écart de production par rapport à celui placé sur la stabilisation de l’écart de l’inflation à sa cible. Svensson (1997a) retient une forme très simple du modèle de l’économie :

$$\begin{aligned} \pi_{t+1} &= \pi_t + \alpha_1 x_t + \eta_{t+1} \\ x_{t+1} &= \beta_1 x_t - \beta_2 (i_t - \pi_t) + \varepsilon_{t+1} \end{aligned} \quad (1.4)$$

$\alpha_1, \beta_1, \beta_2 \geq 0$ ,  $\beta_1 < 1$  et  $\eta, \varepsilon$  des chocs i.i.d.. La condition de premier ordre résultant de la minimisation de (1.2) sous la contrainte de (1.4) s’écrit :

$$E_t(\pi_{t+2}) - \pi^T = c(\lambda)(E_t(\pi_{t+1}) - \pi^T) \quad (1.5)$$

avec  $c(\lambda)$  un coefficient positif, croissant par rapport à  $\lambda$ ,  $c(0) = 0$  et  $\lim_{\lambda \rightarrow +\infty} c(\lambda) = 1$ . L’équation (1.5) prescrit que l’écart anticipé par la banque centrale en  $t + 2$  entre l’inflation et la cible soit une fraction  $c(\lambda) < 1$  de l’écart anticipé pour  $t + 1$ . Le retour de l’inflation anticipée à la cible est alors graduel : plus la banque centrale se préoccupe de l’activité ( $\lambda$  élevé), plus longue est la période pendant laquelle l’inflation anticipée dévie de la cible. Dans le cas où la banque centrale ne cible que l’inflation ( $\lambda = 0$ ), on parle de ciblage strict (Svensson (1997a)), l’inflation anticipée est en permanence égale à la cible. Dans cette formulation, les anticipations de la banque centrale jouent le rôle d’objectif intermédiaire. Svensson (1997a) parle de *ciblage prévisionnel*. La règle (1.5) est une règle dite *optimale* – ou *d’objectif* – et caractérise un régime de ciblage de l’inflation (Svensson (1997a, 1999, 2003), Clarida et al. (1999)). Cette formulation ne requiert pas que la banque centrale puisse s’engager au préalable sur la règle. De plus, bien que la transparence soit un élément central des régimes de ciblage de l’inflation, son rôle n’apparaît pas dans cette modélisation. En effet, la politique monétaire sera la même que la banque centrale explique les règles (1.1) ou (1.5) au public ou qu’elle les garde secrètes (Kuttner (2004)).

Une troisième formulation du ciblage d'inflation comme une règle impose en plus que la banque centrale puisse *s'engager* à conduire la politique monétaire selon la règle optimale. King (1997) envisage le ciblage de l'inflation de cette manière. Le rôle de l'information donnée au public quant à la conduite future de la politique monétaire est dans ce cas essentiel. En effet, la banque centrale détient de l'information privée sur ses objectifs de produit et d'inflation. La transparence permet de révéler cette information aux agents et leur permet d'évaluer les performances de la politique monétaire. Au regard de ces performances, les agents accordent de la crédibilité à la banque centrale, qui est ainsi responsabilisée par rapport à ses objectifs (*accountability*). Le ciblage de l'inflation apparaît alors comme une solution au biais inflationniste. La transparence que ce régime impose joue ainsi un rôle indirect sur les performances macroéconomiques : il modifie les incitations auxquelles font face les autorités monétaires.

Dans cette littérature, la banque centrale peut agir sous deux régimes de politique monétaire. L'un est associé à un mécanisme d'engagement sur une règle, mais n'est pas crédible (*time-inconsistent*) dans la mesure où la banque centrale aura toujours intérêt à en dévier dans le futur. L'autre est qualifié de discrétionnaire car elle peut réviser sa politique à chaque période. Adopter un régime de ciblage d'inflation revient alors à contraindre la banque centrale par la transparence à agir comme si elle pouvait s'engager sur la règle optimale : on parle de *discretion constraint* (Bernanke et al. (1999))<sup>4</sup>. L'annexe I.1 présente une modélisation du biais inflationniste et montre comment un régime de ciblage de l'inflation peut être envisagé comme une parade à ce biais.

Tout d'abord, l'annonce de la cible renforce la *transparence politique* de la banque centrale, au sens de Geraats (2002), c'est-à-dire la clarification de ses objectifs et des incitations induites par l'arrangement institutionnel mis en oeuvre. Cette formalisation du ciblage d'inflation se fonde sur les travaux traitant de la transparence sur les préférences des autorités monétaires (notamment les contributions de Cukierman & Meltzer (1986) et Cukierman (1986) puis Faust & Svensson (2001, 2002). Cukierman & Meltzer (1986) montrent comment la transparence permet de réduire le biais inflationniste mais au prix de la limitation de la flexibilité de la banque centrale face aux chocs. C'est le fameux arbitrage entre crédibilité et flexibilité (ou responsabilisation et stabilisation)<sup>5</sup>. Walsh (1995), Svensson (1997b) ou Walsh (2003b, chap. 8) interprètent le ciblage de l'inflation comme un cadre type principal-agent dans lequel la société – le principal – assigne à la banque centrale agissant en discrétion – l'agent – une cible d'inflation et la pénalise pour les déviations de l'inflation vis-à-vis de celle-ci. Le modèle de l'économie est décrit par une courbe d'offre à la Lucas, dans laquelle seule

4. Parmi les nombreuses contributions qui ont envisagé ce point, citons notamment Walsh (2003a), Svensson (1999), Svensson (2002), Kuttner & Posen (1999), Faust & Svensson (2001), Hellwig (2002) ou Hallett & Libich (2006).

5. Voir l'annexe I.2 pour une modélisation détaillée de ce point.

l’inflation non-anticipée joue un rôle (positif) sur le produit. Le principal détermine alors les incitations auxquelles la banque centrale doit faire face pour délivrer le taux d’inflation correspondant à la règle optimale sous engagement. Pour une cible appropriée corrigée du biais, le ciblage de l’inflation élimine le biais sans pour autant limiter la réponse stabilisatrice au choc d’offre (Svensson (1997b)). Walsh (1995) montre que ce dispositif est équivalent à un contrat linéaire optimal par lequel la banque centrale reçoit un transfert qui l’incite à délivrer le taux d’inflation optimal à chaque période. Cette contribution est inspirée des problématiques de *design institutionnel* (voir Persson & Tabellini (1993)). Walsh (1999) montre aussi que le biais peut être éliminé, sans distordre la réponse aux chocs, lorsque la banque centrale peut elle-même annoncer sa cible. L’annonce constraint la politique discrétionnaire de la banque centrale : si elle est tentée d’annoncer une cible faible pour créer de l’inflation surprise, elle perd alors la crédibilité des agents lorsqu’ils constatent que le taux d’inflation effectif est plus élevé qu’annoncé. Cette disposition semble plus facile à mettre en oeuvre que l’élaboration d’un contrat ou d’une cible optimale. La cible annoncée représente un objectif clair vis-à-vis duquel le public peut juger des performances de la banque centrale : cette idée traduit clairement la définition du ciblage d’inflation retenue par King (1997) que l’on a mentionnée plus haut. Neumann & von Hagen (2002) montrent par ailleurs qu’empiriquement, le ciblage de l’inflation a amené un gain de crédibilité aux banques centrales qui l’ont adopté.

De manière plus générale, le ciblage de l’inflation n’exige pas seulement de divulguer la cible d’inflation. Il impose une transparence accrue du processus de décision de la politique monétaire. Walsh (1999) définit la transparence comme la capacité du public à surveiller les informations et leur utilisation par la banque centrale. Ces informations peuvent concerner la forme du modèle de l’économie, la valeur de ses paramètres, les objectifs du mandat, les prévisions internes de la banque centrale et les hypothèses sur lesquelles elles reposent ainsi que les informations privées sur les conditions économiques dont dispose la banque centrale. La transparence doit aussi être entendue comme une *transparence économique*, *i.e.* la fourniture d’informations économiques utiles pour limiter l’asymétrie d’information entre les agents et la banque centrale concernant notamment les données et les modèles utilisés et les prévisions (Geraats (2002)). L’ensemble de ces informations, pas seulement la connaissance de la cible d’inflation, est susceptible de permettre à la banque centrale de s’engager sur une règle optimale<sup>6</sup>. Par exemple, Geraats (2009) montre, dans un modèle Nouveau Keynésien très simplifié, comment la banque centrale peut renforcer sa crédibilité sur les objectifs qu’elle a annoncés en fournissant en plus au public ses projections des chocs qui frappent l’économie. A condition que le public connaisse la structure du modèle de l’économie utilisé par la banque centrale, il peut inférer dans quelle mesure les

---

6. Voir l’annexe I.3, page 244 pour une modélisation détaillée de ce point.

décisions de politique monétaire et les résultats obtenus correspondent aux objectifs annoncés. Dans le cadre Nouveau Keynésien de Clarida et al. (1999), Walsh (2003a) montre comment un mandat qui impose à la banque centrale de révéler ses prévisions sur les chocs d'offre permet de répliquer l'équilibre sous engagement sur une règle alors que la banque centrale est soumise à des pressions expansionnistes. Ce résultat s'obtient sans distordre la réponse aux chocs.

Même si, dans cette définition du ciblage, le terme *règle* peut s'entendre comme une fonction de réaction qui régit l'action des autorités monétaires de manière systématique et sur laquelle elles peuvent se pré-engager, notons qu'il est irréaliste de supposer qu'une banque centrale puisse suivre mécaniquement une règle (Bernanke (2004)). De plus, les premières études empiriques du ciblage de l'inflation (Bernanke & Mishkin (1997), Bernanke et al. (1999)) décrivent un cadre plus large ("*a framework, not a rule*"). En ce sens, il s'agit en fait d'entendre le terme *règle* dans un sens large comme un dispositif qui encadre la conduite de la politique monétaire : "*a monetary-policy rule is interpreted broadly as a prescribed guide for monetary-policy conduct*", Svensson (2003). Une règle optimale de la forme (1.5) donne par exemple une grande latitude aux autorités monétaires en permettant l'inclusion d'éléments subjectifs (leur jugement) dans la formulation des anticipations (Svensson (2003)). King (2005) plaide aussi pour une définition moins stricte du ciblage de l'inflation : "*Inflation targeting should be conceived of as a way of implementing the optimal reaction function*". Un des rôles de la transparence dans ce contexte est de faire en sorte que la stratégie de politique monétaire qui découle de l'adoption d'un régime de ciblage d'inflation (un cadre particulier pour la conduite de la politique monétaire) s'apparente à une règle de politique monétaire au sens strict (la stratégie optimale qui découlerait d'un mécanisme de pré-engagement).

Pour conclure cette section, la modélisation du ciblage de l'inflation en tant que règle peut être discutée à plusieurs égards. D'un point de vue empirique, l'existence du biais inflationniste est une hypothèse contestée (voir notamment Walsh (2003b, chap 8.)). Les développements ci-dessus tendraient à montrer qu'un pays ayant adopté un régime de ciblage de l'inflation connaîtrait un taux d'inflation plus faible qu'un pays poursuivant une stratégie de politique monétaire différente. Bernanke et al. (1999) concluent à un impact retardé du ciblage de l'inflation sur le niveau et la variabilité de l'inflation. Roger (2009) montre que les pays ayant adopté un régime de ciblage de l'inflation ont globalement de meilleurs résultats macroéconomiques, même si la banque centrale rate souvent la cible annoncée. De plus, ces pays tendent à mieux contrecarrer l'impact des chocs sur leur produit que les pays qui n'ont pas adopté un cadre de ciblage de l'inflation. Geraats (2009) trouve une baisse du niveau de l'inflation, mais dans l'ensemble des pays engagés dans une transparence accrue de la politique monétaire, et pas seulement dans les pays en ciblage de l'inflation, même si ceux-là tendent à avoir la politique monétaire

la plus transparente.

D’un point de vue théorique, le recours à l’incohérence temporelle repose sur le postulat que la banque centrale a une incitation à surprendre les agents en créant de l’inflation surprise pour pousser le produit au delà de son niveau naturel. Or cette hypothèse a été critiquée, notamment par des praticiens (Blinder (1997), Vickers (1998)). En outre, comme le rappelle Walsh (1999), la littérature sur l’incohérence temporelle nie toute place à une *stratégie* de communication puisque les annonces de la banque centrale ne sont pas considérées *a priori* comme crédibles. De plus, les banques centrales cibleuses sont indépendantes donc *a priori* délivrées des pressions électoralistes et n’ont donc pas d’incitation à créer de l’inflation surprise (Geraats (2002)). Carpenter (2004) juge ainsi qu’il y a peu de leçons à tirer pour les praticiens de la littérature économique sur la transparence pour laquelle on a recours à des modèles où les effets réels de la politique monétaire proviennent de la surprise du public. Pour ces raisons, McCallum (1998) plaide davantage pour des fondements pragmatiques du ciblage de l’inflation plutôt que pour des fondements théoriques inspirés de la littérature sur l’incohérence temporelle. De plus, restreindre le ciblage de l’inflation aux définitions développées dans cette section ne permet pas de différencier les régimes de ciblage de l’inflation des autres stratégies de politique monétaire anti-inflationnistes (King (2005)). Comme le rappellent Demertzis & Viegi (2009), la majeure partie des discussions théoriques est influencée par la politique de la Réserve Fédérale et ne fait donc pas réellement cette distinction. Enfin, Kuttner (2004) évalue empiriquement quelles formes de règle parviennent le mieux à représenter la conduite de la politique monétaire de trois pays cibleurs (la Suède, la Nouvelle-Zélande et le Royaume Uni) et de la Fed. Les résultats mitigés de son étude l’amènent à conclure que les propriétés du ciblage de l’inflation n’affectent pas tant la conduite de la politique monétaire en tant que telle mais plutôt directement les anticipations du public et des marchés.

Ces remarques plaident pour un enrichissement de la modélisation des régimes de ciblage de l’inflation qui mette davantage l’accent sur les spécificités d’un régime de ciblage de l’inflation en quittant le cadre théorique de l’incohérence temporelle. La banque centrale n’aurait alors pas d’incitation à surprendre le public mais au contraire, à rendre sa politique compréhensible et prévisible auprès des agents. Elle pourrait ainsi directement influencer leurs anticipations, en particulier leurs anticipations d’inflation et par ricochet, les résultats macroéconomiques de la politique menée. On parle du canal des anticipations de la politique monétaire. La section suivante explore les fondements de cette stratégie de *management des anticipations* (Woodford (2005)).

## II Pourquoi et comment la transparence induit des effets économiques

Toutes les banques centrales sont devenues plus transparentes, en particulier celles en ciblage (Geraats (2009)). La transparence n'agit pas seulement de manière indirecte sur les incitations auxquelles fait face la banque centrale. Elle ne permet pas seulement au public de surveiller la conduite de la politique monétaire. La transparence a aussi un effet économique direct en permettant à la banque centrale d'influencer l'ensemble d'informations que détiennent les agents et par là leurs anticipations des taux d'intérêt futurs, de l'inflation et de l'économie réelle. Leurs anticipations exercent en retour un effet sur l'économie et c'est par cet effet que la banque centrale peut aussi influencer l'économie (Hellwig (2002), Walsh (2006), Svensson (2008), Boivin (2011)). Le modèle Nouveau Keynésien de base, tel qu'il est présenté par Woodford (2003b), permet d'illustrer l'importance de ce mécanisme (Blinder et al. (2008), Rudebusch & Williams (2008), Geraats (2009))<sup>7</sup>. L'écart de production est déterminé par une courbe IS prospective qui décrit une relation inverse entre la production agrégée et le taux d'intérêt réel *ex ante*  $i_t - E_t(\pi_{t+1})$  :

$$x_t = E_t(x_{t+1}) - (i_t - E_t(\pi_{t+1}) - r_t^*) \quad (1.6)$$

où  $r_t^*$  désigne le taux d'intérêt naturel, supposé suivre un processus stationnaire connu. L'équation (1.6) peut être réécrite à  $T - 1$  périodes comme :

$$x_t = -E_t \sum_{j=0}^{T-1} (i_{t+j} - \pi_{t+j+1} - r_{t+j}^*) + E_t(x_{t+T}) \quad (1.7)$$

et l'écart de production courant est influencé par le sentier des taux d'intérêt réels futurs anticipés. On peut reformuler (1.7) en fonction du taux d'intérêt réel anticipé à  $T$  périodes  $R_{T,t}$  qui vaut, en faisant abstraction d'une prime de risque, la moyenne des taux d'intérêt réels anticipés sur les  $T$  périodes :

$$R_{T,t} \equiv -E_t \frac{1}{T} \sum_{j=0}^{T-1} (i_{t+j} - \pi_{t+1+j}) \quad (1.8)$$

On a donc :

$$x_t = -T(R_{T,t} - R_{T,t}^*) + E_t(x_{t+T}) \quad (1.9)$$

---

7. Voir la section II au chapitre 2 pour une dérivation complète de ce modèle.

où  $R_{T,t}^* \equiv E_t \frac{1}{T} \sum_{j=0}^{T-1} r_{t+j}^*$  est le taux d’intérêt naturel moyen anticipé sur les prochaines  $T$  périodes. Le taux d’inflation est donné par une courbe de Phillips Nouvelle Keynésienne de la forme :

$$\pi_t = E_t(\pi_{t+1}) + \kappa x_t + u_t \quad (1.10)$$

où  $u$  est un choc sur les prix suivant un processus stationnaire et  $\kappa > 0$  la pente de la courbe de Phillips. En exprimant l’équation (1.10) à  $T$  périodes, on obtient :

$$\pi_t = \kappa E_t \sum_{j=0}^{T-1} (x_{t+j} + u_{t+j}) + E_t(\pi_{t+T}) \quad (1.11)$$

Le taux d’inflation courant dépend alors non seulement de l’anticipation d’inflation à  $T$  périodes mais aussi des anticipations de l’écart de production sur les  $T$  prochaines périodes, qui dépendent elles-mêmes du sentier anticipé du taux d’intérêt réel entre  $t$  et  $T$ . Les équations (1.9) et (1.11) montrent un point central de la conduite de la politique monétaire : alors que la banque centrale fixe le taux d’intérêt au jour le jour  $i_t$ , les décisions économiques des agents qui influencent la demande (épargne, investissement) et donc l’inflation dépendent des taux d’intérêt à un horizon plus lointain. Le modèle peut être clos par une règle de taux d’intérêt du type (1.1).

Si l’environnement économique est stable (i.e. les équations (1.6), (1.10) et (1.1) ne changent pas dans le temps), si la banque centrale est engagée de manière crédible sur la règle de politique monétaire (1.1) et si les anticipations des agents sont rationnelles au sens de Muth (1961), c’est-à-dire cohérentes avec le modèle de l’économie, la transparence de la banque centrale ne joue aucun rôle économique (Blinder et al. (2008)). Le public pourrait déduire la règle de la banque centrale et prédire les futurs taux d’intérêt en fonction des données économiques observées chaque période (Woodford (2005)). Ces hypothèses sont irréalistes et trois facteurs confèrent un rôle potentiellement important à la communication de la banque centrale : la *non-stationnarité* du modèle de l’économie et l’*apprentissage* qui en découle, qui peut être compliqué par la *non-rationalité des anticipations*, l’*asymétrie d’informations* entre le public et les autorités monétaires et la *non crédibilité* de la banque centrale. Ce troisième point a été traité à la section précédente. Dans ce qui suit, nous nous focalisons sur les deux autres. Les signaux des autorités monétaires (qui peuvent aller de l’annonce d’une cible explicite aux mots prononcés lors des discours des gouverneurs) peuvent alors influencer les anticipations des agents et ainsi les résultats économiques. Dans le modèle, une action de la banque centrale a au moins trois canaux de transmission à l’économie : i) l’effet direct du taux  $i$  sur la demande  $x$ , ii) l’effet direct des signaux de la banque centrale sur le sentier de taux d’intérêt réels anticipés, et les anticipations d’inflation et d’écart de production qui jouent en retour sur la demande  $x$  (équation (1.9)) et l’inflation

$\pi$  (équation (1.11)) iii) l'effet d'un changement de  $i$  sur la séquence entière des taux anticipés  $R_{T,t}$  (équation (1.8)) qui influence ensuite la demande et l'inflation. Le premier effet est mineur et les deux autres dépendent clairement de la politique de communication de la banque centrale (Blinder et al. (2008)). Les banques centrales ont ainsi un rôle de *managers d'anticipations* (Woodford (2003b)).

Cependant, la littérature, tant théorique qu'empirique, ne s'accorde pas sur l'impact nécessairement positif d'une transparence accrue en matière de stabilisation macroéconomique<sup>8</sup>. Les divergences s'expliquent en partie par les différents modèles mobilisés pour représenter les mécanismes de transmission de la politique monétaire (Cukierman (2002)). En pratique, les banques centrales limitent leur transparence, très peu d'entre elles annoncent leurs projections de taux d'intérêt et les délibérations internes sont en général gardées secrètes. Deux types d'arguments susceptibles de justifier la limitation de la communication ont été mis en avant dans la littérature. Le premier a trait aux limites cognitives des agents à traiter les quantités d'informations qu'ils reçoivent (Kahneman (2003)). Le second a été mis en avant par Morris & Shin (2002) dans la littérature sur les jeux de coordination. Ces jeux impliquent que le *pay-off* de chaque joueur dépend de sa capacité à deviner les croyances des autres et donc à coordonner ses actions avec eux. En communiquant, la banque centrale révèle son information privée mais coordonne aussi les croyances des agents. Or, dès que les agents ont intérêt à coordonner leurs anticipations, ils auraient tendance à se focaliser sur les signaux publics au détriment de leur information privée, plus coûteuse à obtenir. Dans le cas de la politique monétaire, les agents peuvent de ce fait sur-réagir à l'information publique et amplifier l'impact des erreurs de prévision de la banque centrale sur l'économie. Ce résultat est aussi établi par Ueda (2010). Il propose une modélisation dans laquelle la banque centrale et les acteurs des marchés financiers s'échangent des informations. La banque centrale doit à la fois influencer les anticipations privées en diffusant de l'information tout en tentant d'extraire des informations des marchés pour former ses propres prévisions. Il conclut dans le sens de Morris & Shin (2002) : compte tenu du coût d'acquisition des informations pour les agents, ils n'ont pas intérêt à révéler leur information privée à la banque centrale mais à se reposer entièrement sur ses annonces pour former leurs anticipations. La banque centrale est alors privée d'informations pertinentes, ce qui détériore ses propres anticipations. Les performances de la politique monétaire s'en trouvent alors amoindries. Ueda (2010) montre le risque d'un "effet miroir" : les anticipations privées que la banque centrale tente d'analyser risquent de ne refléter que ses propres informations transmises au public. James & Lawler (2011) intègrent une fonction de réaction de la banque centrale au cadre de Morris & Shin (2002) et montrent aussi que la transparence est négative en raison du risque du

8. Voir par exemple Geraats (2002, 2009), Eijffinger & van der Cruijsen (2007), Blinder et al. (2008), Minegishi & Cournède (2009), et Cornand & Baeriswyl (2011) pour une revue de ce débat.

sur-réaction du public.

Néanmoins, plusieurs travaux contrebalaient ces conclusions. Il semblerait que la fourniture d’informations publiques soit coûteuse en termes de bien-être seulement à deux conditions : i) si l’information publique est très imprécise en comparaison de l’information privée dont disposent les agents (Woodford (2005), Svensson (2007) entre autres) ou ii) si les agents privés ne sont pas capables d’évaluer correctement le bruit dans l’information publique (Dale et al. (2011)). La condition i) est peu vraisemblable dans le contexte de la conduite de la politique monétaire. Par exemple, Romer & Romer (2000) ont montré que les banques centrales disposent en général d’informations plus précises que le public. La condition ii) plaide davantage pour améliorer la qualité de la communication de la banque centrale que pour la limiter. De plus, certains auteurs, comme Demertzis (2011) ont pointé que le résultat de Morris & Shin (2002) tiendrait à la spécificité des hypothèses de leur modèle, relativisant ainsi sa généralité. En effet, dans leur modèle, la fonction d’utilité de chaque agent valorise la coordination entre agents mais au niveau du bien-être agrégé, la coordination est un jeu à somme nulle et n’est donc pas valorisée. A cet égard, Hellwig (2004) conclut au rôle strictement positif de la transparence sur le bien-être social en introduisant une complémentarité au niveau social, de sorte à valoriser dans l’utilité agrégée la coordination des agents.

La section qui suit explore le rôle de la transparence dans le contexte d’un régime de ciblage de l’inflation en situation d’asymétrie d’informations, nous envisageons ensuite le rôle de ce type de régime lorsque les anticipations des agents ne sont pas supposées rationnelles.

### III Transparency, asymétrie d’informations et ciblage de l’inflation

La transparence permet de diminuer l’asymétrie d’informations entre le public et la banque centrale. Ceci limite l’incertitude sur les actions futures de la politique monétaire et assure à la banque centrale un meilleur contrôle de l’économie. Ceci permet aussi aux agents de coordonner leurs croyances et ainsi leurs actions et contribue à limiter la volatilité macroéconomique. Nous retenons les différentes formes de transparence mises en avant par Minegishi & Cournède (2009) à savoir la transparence sur les *objectifs* (notamment l’annonce d’une cible), la transparence sur les *décisions* de politique monétaire (notamment l’annonce d’un sentier de taux d’intérêt), la transparence sur l’*analyse* qui sous-tend ces décisions (notamment la publication des estimations de la banque centrale des chocs et de l’évolution de l’économie) et la transparence sur le processus de décisions des actions de politique monétaire. Le

dernier point concerne avant tout les décisions prises par les comités de politique monétaire. Nous nous concentrerons plutôt sur les trois premières formes de transparence et renvoyons le lecteur intéressé par ce dernier point aux contributions mentionnées par Eijffinger & van der Cruijsen (2007), en particulier les travaux de Sibert (2003). En général, les arguments en faveur de la transparence sur le processus de décisions répondent à des considérations liées à la responsabilisation des décideurs.

### III.1 Coordonner les anticipations d'inflation par l'annonce d'une cible

Nous choisissons de développer le modèle de Demertzis & Vieggi (2009), en nous appuyant également sur Demertzis & Vieggi (2008), car il décrit explicitement la manière dont la connaissance de la cible par les agents permet de coordonner leurs anticipations d'inflation. La politique monétaire est modélisée comme un jeu entre les agents et la banque centrale dans le cadre d'analyse développé par Bacharach (1993). La banque centrale a une fonction de perte quadratique usuelle de la forme de (1.3) avec un poids équivalent sur l'inflation et l'écart de production (i.e.  $\lambda = 1$ ). L'économie est décrite par une fonction d'offre agrégée à la Lucas :

$$x = \pi - \pi^e + e \quad (1.12)$$

avec  $e$  un choc d'offre de moyenne nulle et de variance  $\sigma_e^2$  et  $\pi^e \equiv \int_0^1 E_i(\pi) di$  l'anticipation moyenne d'inflation sur le continuum d'agents privés dans l'économie, indexés par  $i \in [0, 1]$ . La minimisation de (1.3) sous contrainte de (1.12) donne l'inflation *ex post* conditionnelle à la réalisation du choc  $e$  :

$$\pi = \frac{1}{2}(\pi^T + \pi^e - e) \quad (1.13)$$

Chaque agent connaît le modèle de l'économie et cherche à prédire le taux d'inflation futur en minimisant la fonction de désutilité suivante :

$$u_i(\pi^e, \pi^T) = \frac{1}{2}(E_i(\pi) - \pi)^2 \quad (1.14)$$

qui dépend de la cible d'inflation  $\pi^T$  et du profil d'anticipations de tous les autres agents  $\pi^e$  via (1.13). L'utilité de chaque agent dépend ainsi des anticipations des autres : cela constitue une situation d'interdépendance stratégique. A partir de (1.13), l'action optimale de chaque agent  $i$  est donnée par :

$$E_i(\pi) = \frac{1}{2}E_i(\pi^T - e) + \frac{1}{2}E_i(\pi^e) \quad (1.15)$$

Chaque agent  $i$  forme son anticipation d’inflation  $E_i(\pi)$  à l’aide de son ensemble d’informations économiquement pertinentes. On compare deux cas.

Dans le premier, chaque agent dispose d’un signal privé qui lui est propre –  $z_i \equiv (\pi^T - e) + \varepsilon_i$  ;  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$  et  $E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0, i \neq j$  – et d’un signal public –  $p \equiv (\pi^T - e) + \eta$ ,  $\eta \sim N(0, \sigma_\eta^2)$ , disponible à tous les agents. Les deux termes d’erreur sont indépendants de  $\pi$  et non corrélés entre eux. L’agent  $i$  forme son anticipation d’inflation comme suit (Morris & Shin (2002)) :

$$E_i(\pi) = \pi^T - e + \frac{2\sigma_\eta^2 \eta + \sigma_\varepsilon^2 \varepsilon_i}{2\sigma_\eta^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (1.16)$$

L’anticipation moyenne dans la population d’agents vaut alors :

$$\pi^e = \int_0^1 E_i(\pi) di = \pi^T - e + \frac{2\sigma_\eta^2 \eta}{2\sigma_\eta^2 + \sigma_\varepsilon^2} \quad (1.17)$$

Dans le second cas, les agents disposent en outre de la cible d’inflation annoncée par la banque centrale ( $\pi^T$ ). Ils disposent alors de deux stratégies : conserver leur anticipation formée par (1.16) ou ancrer leur anticipation d’inflation sur la cible annoncée par la banque centrale, i.e.  $E_i(\pi) = \pi^T$ .

D’un point de vue statique, si les anticipations d’inflation sont coordonnées sur la cible de sorte que  $\pi^e = \pi^T$ , on a  $E(\pi) = \pi^T$  et la cible est atteinte en moyenne. La banque centrale a donc intérêt à ancrer les anticipations d’inflation des agents sur la cible. Lorsque les agents adoptent la stratégie (1.16), l’anticipation moyenne dans l’économie vaut (1.17). Via (1.13), l’inflation espérée est aussi égale à la cible, i.e.  $E(\pi) = \pi^T$ . Cependant, la variabilité de l’inflation est plus élevée dans ce cas que si les anticipations des agents sont ancrées sur la cible. En effet, si l’anticipation moyenne d’inflation vaut (1.17), on a  $\sigma_\pi^2 = \frac{1}{2}\sigma_e^2 + \frac{\sigma_\varepsilon^2}{2\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\eta^2}$  alors que si  $\pi^e = \pi^T$ , on a  $\sigma_\pi^2 = \frac{1}{2}\sigma_e^2$ . L’ancrage des anticipations sur la cible d’inflation est alors la stratégie préférable du point de vue de la stabilisation de l’inflation en présence de chocs.

D’un point de vue dynamique, les agents choisissent entre les deux stratégies en fonction de la crédibilité qu’ils accordent à la banque centrale en fonction de ses performances passées. La banque centrale annonce une cible  $\pi^T$  et une fourchette de tolérance autour de  $2\rho$ . Soit l’événement  $S$  correspondant à un succès, i.e. la banque centrale a atteint la cible,  $|\pi_t - \pi^*| < \rho$  et  $P(S)$  la probabilité d’occurrence de  $S$ . Soit  $v \in [0, 1]$  le degré de crédibilité de la cible, i.e. la probabilité de l’événement  $C$  : "la banque centrale est crédible". Lorsque la banque centrale obtient un succès, la cible gagne en crédibilité alors que si la banque centrale rate la cible, elle en perd. Or, la probabilité de réussir dépend de sa crédibilité. Il y a donc une boucle qui se met en place : si la banque centrale échoue, elle perd de sa crédibilité et il lui est d’autant plus difficile dans les périodes suivantes de réussir à ancrer les

anticipations des agents sur la cible et ainsi d'obtenir un succès (et inversement). Ce mécanisme est amplifié par l'ampleur des perturbations économiques  $\sigma_e^2$ . Il est d'autant plus difficile pour la banque centrale d'atteindre sa cible et d'améliorer sa crédibilité que les chocs  $e$  sont forts (et inversement).

On suppose que la banque centrale commence avec un certain niveau de crédibilité  $v_0$  et les agents révisent ensuite leur confiance de manière bayésienne :

$$\text{si } S_t \text{ alors } v_{t+1} = \frac{\text{Prob}(S/C)}{\text{Prob}(S)} \text{Prob}(C) \text{ et } v \text{ augmente} \quad (1.18)$$

$$\text{si } \bar{S}_t \text{ alors } v_{t+1} = \frac{\text{Prob}(\bar{S}/C)}{\text{Prob}(\bar{S})} \text{Prob}(C) \text{ et } v \text{ diminue} \quad (1.19)$$

Demertzis & Viegi (2008) dérivent un seuil minimum de crédibilité  $v^*$  à partir duquel les agents se coordonnent sur la cible. Ce seuil est fonction de  $\sigma_\varepsilon^2$  et  $\sigma_\eta^2$  la précision des signaux privé et public et de  $\sigma_e^2$ , la variabilité du choc  $e$ . Demertzis & Viegi (2009) montrent que l'annonce de la cible permet à la banque centrale d'ancrer les anticipations sur sa cible, ce qui limite la variabilité de l'inflation, dans trois configurations.

i) Il faut que les chocs d'offre soient d'ampleur modérée, sous peine pour la banque centrale de ne pas délivrer le taux d'inflation ciblé (équation (1.13)) et de perdre sa crédibilité. Ce résultat corrobore parfaitement les stratégies suivies par plusieurs pays précurseurs du ciblage de l'inflation (notamment la Nouvelle Zélande ou l'Angleterre) d'annoncer une cible une fois un processus de désinflation enclenché. Lorsque l'environnement économique est très stable ou au contraire très instable, le régime de ciblage de l'inflation n'assure pas de performances significativement supérieures au cas où la cible n'est pas annoncée. Ceci fait écho aux récents débats sur l'évaluation du ciblage de l'inflation, sachant que ce régime a été mis en place lors de la période dite de grande modération, caractérisée par une diminution conjointe de la variabilité de la production et de l'inflation. Cette période pourrait avoir des déterminants structurels, si bien que le ciblage de l'inflation n'aurait pas encore été réellement mis à l'épreuve.

ii) Il faut que l'information publique soit suffisamment bruitée, sinon l'annonce de la cible est superflue.

iii) Si la crédibilité initiale de la banque centrale est assez forte, la boucle crédibilité/succès peut s'enclencher et ancrer les anticipations sur la cible. Ces résultats appuient le bilan du ciblage de l'inflation dressé par Walsh (2009) : dans les pays développés, où l'information publique est de bonne qualité, il semble que les effets macroéconomiques du ciblage de l'inflation soient au moins non-négatifs alors que l'apport du ciblage de l'inflation semble beaucoup moins discutable dans les pays émergents.

La transparence sur l'objectif de la banque centrale tend donc à diminuer la volatilité de l'inflation.

tion par une meilleure coordination des anticipations d’inflation des agents. Plusieurs autres travaux abordent le rôle coordinateur de l’information de la banque centrale, en particulier de la transparence sur l’analyse (prévisions des chocs) et sur les décisions (projections du taux d’intérêt). Dans ces modèles, cette forme de transparence influence le comportement de fixation de prix des firmes en limitant l’incertitude sur les actions de la banque centrale. C’est l’objet de la sous-section suivante.

### III.2 Réduire l’incertitude par la publication des prévisions de la banque centrale

La transparence sur les décisions et l’analyse macroéconomique est celle qui s’est le plus développée ces dernières années au sein des banques centrales (Geraats (2009)). Elle permet de réduire l’incertitude des agents sur l’économie et de rendre ainsi la politique monétaire plus compréhensible pour eux. En effet, lorsque la banque centrale ne délivre aucune information, ce sont ses actions (en particulier les mouvements des taux d’intérêt) qui informent les agents des chocs qui affectent l’économie. Cet effet des actions de la banque centrale sur les anticipations des agents affecte sa capacité à stabiliser l’économie et crée un *biais d’opacité*. En effet, si un changement du taux d’intérêt nominal  $i$  induit en même temps un changement dans les anticipations d’inflation  $E(\pi)$ , la variation du taux d’intérêt réel  $i - E(\pi)$ , donc la réaction de la banque centrale est limitée. La transparence sur les prévisions internes de la banque centrale permet d’éliminer ce biais et de conduire une politique plus performante (Walsh (2007, 2008)). Dans la même veine, Cornand & Baeriswyl (2010) montrent qu’une politique monétaire opaque augmente l’incertitude fondamentale et stratégique sur les actions de la banque centrale. Elle est ainsi moins efficace pour stabiliser l’inflation car une contraction de la demande a moins d’effet sur le niveau des prix. En cas de choc d’offre, donc en cas d’arbitrage entre les objectifs de produit et d’inflation, la banque centrale a alors intérêt à choisir une politique accommodante vis-à-vis de l’inflation en favorisant la demande. La transparence permet alors une politique monétaire plus efficace sur l’inflation et en réduit la volatilité.

Cependant, la divulgation des informations de la banque centrale n’est pas nécessairement bénéfique car les agents incorporent ces informations dans leurs anticipations, ce qui peut causer en retour davantage de variabilité macroéconomique. Par exemple, la publication des anticipations de chocs d’offre peut se répercuter (positivement) dans les anticipations d’inflation, ce qui complique la stabilisation de l’inflation autour de sa cible (Cukierman (2001)). Il en va de même si la banque centrale est parfaitement transparente sur son objectif de production, même si elle cible le niveau naturel : ceci entraîne des problèmes de crédibilité et une augmentation des anticipations d’inflation (Cukierman (2002)).

### Transparence sur l'analyse macroéconomique (publication des prévisions de chocs)

Les travaux évaluant le bénéfice de la transparence en matière de prévisions de la banque centrale ont recours à des modèles micro-fondés (voir par exemple Walsh (2007)). Dans ces modèles, les firmes, en situation de concurrence monopolistique, fixent leur prix en fonction du prix relatif anticipé. Le prix relatif anticipé dépend lui-même du niveau général des prix anticipé, qui incorpore les prix fixés par les autres firmes, prix dépendant eux-mêmes des anticipations des autres firmes... Si elles disposent d'informations hétérogènes, elles sont placées dans un contexte d'incertitude d'ordre supérieur<sup>9</sup>. Dans ce contexte, les délais d'ajustement des prix face aux chocs ne proviennent plus seulement de coûts d'ajustement ("menu costs"), comme dans le modèle Nouveau Keynésien avec information homogène. Ils proviennent également de l'hétérogénéité de l'information dont disposent les firmes qui les amène à fixer des prix différents. Cette dispersion inefficace des prix augmente la persistance des chocs et cause des coûts en termes de bien être liés à l'inflation (voir notamment Woodford (2003a)). C'est sur cette seconde source de délai d'ajustement des prix que l'information donnée par la banque centrale peut avoir un effet coordinateur. Hellwig (2002) discute à cet égard, de manière non-formalisée, le rôle coordinateur de l'annonce de la cible d'inflation et des prévisions de la banque centrale sur les chocs d'offre. D'une part, Hellwig explique que l'annonce de la cible d'inflation élimine l'incertitude d'ordre supérieur concernant les objectifs de la banque centrale, ce qui diminue l'incertitude d'ordre supérieur concernant le niveau général des prix futur. Les délais d'ajustement des prix dûs à l'hétérogénéité de l'information entre les firmes sont alors limités. D'autre part, les chocs d'offre peuvent avoir des effets fortement persistants en présence d'incertitude d'ordre supérieur : même si tous les agents sont individuellement convaincus que le produit potentiel est supérieur, le produit effectif reste faible si tous les agents pensent que les autres agents pensent que le produit potentiel restera faible. Dans ces conditions, si la banque centrale rend publiques ses prévisions sur les chocs d'offre, les anticipations des agents peuvent être mieux coordonnées sur le niveau du produit potentiel et les chocs d'offre sont rendus moins persistants.

Formellement, en suivant Walsh (2007), soient  $w$  la probabilité qu'une firme puisse ajuster son prix à une période donnée (rigidité des prix à la Calvo (1983)),  $\beta$  le taux d'actualisation des agents,  $\kappa$  la pente de la courbe de Phillips et  $s_j$  un choc sur les prix spécifique à chaque firme  $j$ .  $E^j(\cdot)$  représente l'anticipation de chaque firme  $j$  conditionnelle à son ensemble d'informations spécifique. Soient  $\pi_{j,t}^* \equiv p_{j,t}^* - p_{t-1}$  la variable de décision de chaque firme  $j$  avec  $p_{j,t}^*$  le log du prix fixé par chaque firme qui a l'occasion de réviser son prix en  $t$ ,  $p_{t-1}$  le log du niveau général des prix de la période

---

9. On désigne par *incertitude d'ordre supérieur* l'incertitude sur les croyances des joueurs à propos des croyances des autres joueurs, sur les croyances des joueurs à propos des croyances des autres joueurs à propos des croyances des autres joueurs, etc...

précédente et  $\bar{\pi}_t^*$  la moyenne des  $\pi_{j,t}^*$  parmi les firmes qui ajustent leur prix en  $t$ . Walsh (2007) montre alors que chaque firme adopte la règle de décision suivante<sup>10</sup> :

$$\pi_{j,t}^* = (1-w)E_t^j(\bar{\pi}_t^*) + (1-w\beta)\kappa E_t^j x_t + (1-w\beta)s_{j,t} + \frac{w\beta}{1-w}E_t^j\pi_{t+1} \quad (1.21)$$

En d’autres termes, chaque firme  $j$  ajuste son prix en fonction de son signal privé sur le choc de prix  $s_{j,t}$ , de son anticipation du prix fixé par les autres firmes qui peuvent ajuster leur prix  $E_t^j\bar{\pi}_t^*$  et de son anticipation de l’écart de production  $E_t^j x_t$  et de l’inflation  $E_t^j\pi_{t+1}$  futurs.

Par simplification, la banque centrale fixe l’écart de production désiré  $x^I$ , à un choc de demande  $v$  près, de sorte que l’écart de production effectif vaille  $x_t = x_t^I + v_t$ . L’instrument  $x_t^I$  est supposé observable au début de chaque période  $t$ . Chaque firme ainsi que la banque centrale ont leur propres informations privées sur les chocs  $s$  et  $v$ . Ces chocs sont supposés inobservables avant que les firmes ne fixent leur prix et la banque centrale son instrument. Chaque firme  $j$  observe  $s_{j,t} = s_t + \phi_{j,t}$  et  $v_{j,t} = v_t + \psi_{j,t}$ , avec  $\phi_j$  et  $\psi_j$  des bruits i.n.d.. De même, la banque centrale reçoit  $s_{BC,t} = s_t + \phi_{BC,t}$  et  $v_{BC,t} = v_t + \psi_{BC,t}$ . La banque centrale et les firmes disposant d’informations différentes, leurs anticipations des chocs diffèrent. Ces chocs sont supposés suivre des AR(1) tels que  $s_t = \rho_s s_{t-1} + \xi_t$  et  $\rho_v v_{t-1} + \varphi_t$ .

La banque centrale utilise une règle de la forme  $x_t^I = \delta_1 x_{t-1} + \delta_2 E_t^{BC} s_t + \delta_3 E_t^{BC} v_t$  où les coefficients  $\delta$  sont choisis pour minimiser une fonction de perte usuelle de la forme  $L = \frac{1}{1-\beta}(Var(\pi) + \lambda Var(x))$  ( $var$  désignant la variance). En combinant cette règle avec l’équation de demande agrégée, on obtient la cible d’écart de production de court terme implicite de la banque centrale :

$$x_t^T = x_t^I + E_t^{BC} v_t = \delta_1 x_{t-1} + \delta_2 E_t^{BC} s_t + (1 + \delta_3) E_t^{BC} v_t \quad (1.22)$$

La banque centrale choisit d’annoncer sa cible  $x_t^T$  ou non. Si elle ne l’annonce pas, les firmes ne disposent que de  $x^I$  pour tenter de deviner les prévisions des chocs de la banque centrale  $E_t^{BC} v_t$ . Or, un mouvement de  $x^I$  peut indiquer soit l’anticipation de la banque centrale d’un choc de demande  $v$  ou d’un choc sur les prix  $s$ . Les firmes, par (1.21), ne réagissent qu’à l’anticipation d’un choc sur les prix. Si la réaction à un choc de demande est mal interprétée comme la réaction à un choc d’offre, le choc

---

10. Dans le modèle Nouveau Keynésien de base, il n’y a pas d’incertitude d’ordre supérieur, les firmes ont le même ensemble d’informations et subissent le même choc sur les prix. On a donc  $\pi_{j,t}^* = \bar{\pi}_t^*$ ,  $\forall j$  et on retrouve la règle de décision identique à chaque firme :

$$\pi_t = (1-w)\pi_t^* = \frac{(1-w)(1-w\beta)}{w}(\kappa x_t + s_t) + \beta E_t \pi_{t+1} \quad (1.20)$$

dont l’expression est identique à (1.10).

de demande se répercute sur l'inflation. Si la banque centrale annonce  $x^T$ , les agents peuvent savoir à quel type de choc anticipé la banque centrale réagit en distinguant  $E^{BC}v_t$  de  $E^{BC}s_t$ . La banque centrale peut alors contrecarrer complètement le choc de demande sans que l'inflation ne soit affectée. Intuitivement, on peut penser que la transparence sur  $x^T$  est alors plus efficace mais toute erreur de prévision de la banque centrale quant à  $s$  se propage alors immédiatement à l'inflation via (1.21).

Pour étudier ces effets, Walsh (2007) suppose qu'une fraction  $P \in [0, 1]$  des firmes reçoit l'annonce de  $x^T$ . Ces firmes disposent donc de l'ensemble d'informations  $(s_j, v_j, x^I, x^T)$ , les autres disposant de  $(s_j, v_j, x^I)$ . Pour chaque degré de transparence  $P$ , les coefficients  $\delta^*(P)$  qui minimisent la fonction de perte de la banque centrale sont calculés, avec la valeur de la fonction de perte correspondante. L'auteur établit ensuite le degré optimal de transparence, i.e. le degré  $P^*$  qui minimise la perte étant donné que la banque centrale adopte les coefficients de réaction optimaux correspondants  $\delta^*(P^*)$ . Si ses prévisions des chocs d'offre sont précises ou que ces chocs sont peu persistants ( $\rho_s$  faible), la banque centrale a intérêt à être très transparente ( $P$  proche de 1). Au contraire, plus elle dispose d'informations précises sur les chocs de demande ou plus ces chocs sont transitoires ( $\rho_v$  faible), plus la banque centrale a intérêt à ne disséminer que partiellement sa cible ( $P^* < 0.5$ ). Il en ressort que la banque centrale doit être plus ou moins transparente selon le type de chocs qu'elle anticipe et la qualité de ses prévisions. En particulier, si ces prévisions sont fortement bruitées, elle peut avoir intérêt à communiquer peu pour ne pas amplifier l'effet de ce bruit, dans l'esprit du résultat de Morris & Shin (2002).

D'autres travaux concluent à des effets similaires. Ainsi, Hellwig (2004) montre que la fourniture d'informations publiques est bénéfique. Walsh (2006) obtient également ce résultat lorsque la banque centrale communique ses prévisions des chocs pour une large combinaison de degrés de précision des informations de la banque centrale et des agents. Walsh (2008) montre par contre que l'effet est plus mitigé en ce qui concerne les projections d'écart de production et d'inflation : dès lors que l'information privée des firmes est très précise, elles ont tendance à sur-réagir à l'information publique et à en amplifier le bruit, faisant ainsi référence au risque mis en évidence par Morris & Shin (2002). Cornand & Heinemann (2008) montrent que l'opacité n'est jamais optimale, et qu'une information publique la plus précise possible est toujours meilleure en termes de bien-être. Dans certains cas, lorsqu'il y a un risque de sur-réaction du public, la solution serait de faire des annonces partielles, i.e. de cacher l'information à une partie seulement des agents.

**Transparence sur les décisions (publication du sentier de taux d'intérêt)** Enfin, si la publication de prévision sur l'inflation et l'économie réelle est très répandue parmi les banques

centrales, qu’elles soient cibleuses ou non, il n’en est pas de même pour les publications de sentier de taux d’intérêt. Seulement quelques-unes, toutes en ciblage de l’inflation, ont adopté ce dispositif (parmi lesquelles la Banque de Nouvelle-Zélande, la Banque de Norvège, la Banque d’Islande, la Banque de Suède et la Banque de la République Tchèque). Deux types d’arguments contre ces annonces sont en général mis en avant. Le premier est d’ordre procédural : lorsque la politique monétaire est décidée par un comité, il peut sembler difficile pour les individus qui le composent de se mettre d’accord sur un sentier unique de taux à communiquer au public (Goodhart (2009)). Svensson (2009) rapporte à cet égard l’expérience de la Riskbank, qui parvient à publier une trajectoire de taux alors que le comité de politique monétaire est composé de six membres. Il rétorque qu’en général, seulement un scenario principal et un petit nombre d’alternatives sont discutés, rendant l’entente plus aisée. De plus, cette procédure a, selon lui, l’avantage de rendre le processus de décisions de la banque centrale prospectif et d’orienter les discussions sur les anticipations.

Le second type d’argument pointe que la qualité des projections de taux d’intérêt de la banque centrale n’est pas assurée. Certes, la banque centrale a un avantage informationnel évident sur les agents concernant les taux d’intérêt futurs car elle est naturellement mieux renseignée qu’eux sur ses propres intentions. Sur ce point, Svensson (2006) a montré que dès que l’information publique est plus précise que l’information privée, le risque pointé par Morris & Shin (2002) est évité. Néanmoins, Dale et al. (2011) montrent que cette conclusion optimiste ne tient pas si les agents ne sont pas capables d’évaluer l’imprécision de l’information distillée par la banque centrale. Or, les projections dépendent de l’état courant de l’économie ainsi que des prévisions des chocs qui la frappent et sont sujettes à caution. Il y a donc potentiellement un risque que le public évalue mal le caractère conditionnel des projections de taux d’intérêt et les confondent avec un engagement ferme. De plus, les projections de taux d’intérêt sont basées sur les anticipations d’écart de production, c’est-à-dire l’écart entre le produit et son niveau naturel, alors que les banques centrales publient généralement des prévisions de produit, notamment parce que leurs prévisions du produit naturel sont susceptibles d’être fortement imprécises. Leurs prévisions de taux d’intérêt sont ainsi susceptibles d’être fortement bruitées aussi. Dans ces conditions, il n’est pas sûr que fournir ces projections au public contribue à diminuer l’incertitude entourant la politique monétaire. Cette crainte semble dissuader beaucoup de banques centrales de publier leurs projections de sentier de taux d’intérêt (Walsh (2009)).

Peu de modèles théoriques analysent cette question. Gosselin et al. (2008) utilisent un modèle Nouveau Keynésien à deux périodes dans lequel les agents et la banque centrale ont des informations différentes et la banque centrale mène une politique de lutte contre l’inflation parfaitement crédible. Si la banque centrale révèle ses projections de taux, les anticipations du public et celles de la banque

sont parfaitement alignées et les erreurs de prévisions de la banque sont la seule source de volatilité de l'inflation. Si la banque centrale est opaque, les anticipations des agents diffèrent de celles de la banque, créant de la volatilité supplémentaire de l'inflation. Une politique opaque peut mener à un bien-être supérieur si les anticipations d'inflation du public, basées sur la politique monétaire courante, se répercutent dans l'inflation future de manière à compenser la volatilité créée par les erreurs de prévisions des autorités monétaires. Ce point souligne qu'il n'y a pas de correspondance exacte entre un meilleur ancrage des anticipations et la minimisation de la fonction de perte. Dès que les informations de la banque centrale sont très précises par rapport à celles du secteur privé ou dès que l'information initiale des deux parties est suffisamment précise, la banque centrale a intérêt à révéler ses projections de taux. Il en est de même si l'inflation est un phénomène fortement prospectif, c'est-à-dire si l'inflation courante réagit fortement à l'inflation anticipée. Nous développons ici le modèle de Rudebusch & Williams (2008), qui permet d'arbitrer entre les effets positifs de l'alignement des anticipations des agents avec celles de la banque centrale sur la politique monétaire future avec les risques potentiels de la mauvaise interprétation par les agents de l'information publique bruitée. Le modèle est un modèle Nouveau Keynésien (équations (1.6), (1.10)) dans lequel la banque centrale minimise une fonction de perte :

$$\mathcal{L} = \text{Var}(\pi_t - \pi_t^T) + \lambda \text{Var}(x_t) \quad (1.23)$$

où  $\text{Var}$  désigne la variance. La cible d'inflation  $\pi_t^T$  varie à moyen terme selon le processus :

$$\pi_t^T = \delta \pi_{t-1}^T + v_t, \delta \in (0, 1), v_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_v^2) \quad (1.24)$$

Les chocs persistants sur la cible peuvent se justifier par exemple par des changements dans les facteurs qui déterminent le taux d'inflation optimal (erreur dans la mesure de l'inflation, problèmes associés au plancher zéro du taux d'intérêt...). Woodford (2003b) montre que la règle optimale dans ce modèle s'écrit :

$$\pi_t = \pi_t^T - \frac{\lambda}{\kappa} (x_t - x_{t-1}) + w_t, w_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_w^2) \quad (1.25)$$

à laquelle un choc  $w$  est incorporé, qui correspond à une réponse de la banque centrale à des facteurs transitoires exogènes au modèle (comme par exemple des critères de stabilité financière). Le public et la banque centrale connaissent parfaitement la forme et la valeur des paramètres du modèle (équations (1.6), (1.10) et (1.23)) ainsi que les chocs  $r_t^*$  et  $u_t$ . En revanche, le public ne connaît pas la cible intermédiaire  $\pi_t^T$  et tente de l'inférer des actions passées de la banque centrale et de sa projection de taux  $i_{t+1}^{e,CB} = E_t(i_{t+1}) + z_t$ , où  $z_t \sim \mathcal{N}(0, \sigma_z^2)$  est un bruit de transmission. Cette situation est

particulièrement critique lorsque la banque centrale fait face au plancher zéro du taux d’intérêt nominal et cible implicitement un taux d’inflation temporaire supérieur à la cible de long terme (Eggertsson & Woodford (2003)). Le public fait face à un problème d’extraction du signal : du taux courant  $i_t$ , il peut inférer  $\pi_t^T + w_t$  et de la projection  $i_{t+1}^{e,CB}$ , il peut inférer  $\delta\pi_t^T + z_t$  mais il ne peut pas différencier la cible  $\pi_t^T$  des chocs  $w$  et  $z$ . Le filtre optimal selon les hypothèses posées vaut alors :

$$\hat{\pi}_t^T = \delta\hat{\pi}_{t-1}^T + \gamma(\pi_t^T + w_t - \delta\hat{\pi}_{t-1}^T) + \theta(\delta\pi_t^T + z_t - \delta\hat{\pi}_{t-1}^T) \quad (1.26)$$

où  $\gamma, \theta \in (0, 1)$  sont les gains associés à la révélation respectivement de l’action de la banque centrale  $i_t$  et de la projection  $i_{t+1}^{e,CB}$  et dépendent des paramètres du modèle. Notamment, plus la communication de la banque centrale est précise (plus  $\sigma_z^2$  est faible), plus les agents mettent de poids sur les projections de cette dernière (i.e. plus  $\theta$  est fort relativement à  $\gamma$ ). Les agents estiment la cible intermédiaire  $\pi_t^T$  par (1.26) et sur cette base et la connaissance du modèle de l’économie, ils anticipent l’inflation et l’écart de production.

Les principales conclusions de Rudebusch & Williams (2008) sont les suivantes. D’une part, les divergences entre l’estimation du public de la cible  $\hat{\pi}_t^T$  et sa vraie valeur  $\pi_t^T$  affectent la réponse de la banque centrale aux chocs et créent de la volatilité dans l’inflation et l’écart de production, en plus de celle induite par les chocs. La transparence sur le taux d’intérêt permet d’aligner les anticipations des agents et de la banque centrale sur la conduite future de la politique monétaire et d’éviter cette volatilité supplémentaire. D’autre part, la divulgation du taux futur introduit du bruit ( $z$ ) dans le modèle. Les bénéfices de la transparence sur les taux futurs dépendent de la qualité du signal que les agents perçoivent et non pas de la qualité intrinsèque  $\sigma_z^2$  du signal. En particulier, si les agents surestiment la qualité de la projection de la banque centrale, les agents sur-réagissent à cette information (i.e.  $\theta$  augmente au détriment de  $\delta$  dans (1.26)) et l’inflation et l’écart de production connaissent des fluctuations supplémentaires. Ce résultat rejoint celui de Dale et al. (2011) et le risque dénoncé que les agents pourraient interpréter la projection comme un engagement et en sous-estimer le caractère conditionnel. C’est pourquoi les banques centrales mettent un accent particulier sur la précision de leurs annonces, notamment en expliquant le caractère conditionnel de leurs projections. Ainsi, Svensson (2009) rapporte que ce risque ne semble pas s’être matérialisé dans les pays qui publient ces projections et les banques centrales dévoilent un grand soin à expliquer l’incertitude entourant leurs projections.

Les travaux discutés dans cette section suggèrent que le ciblage de l’inflation peut garantir un meilleur ancrage des anticipations et limiter ainsi la volatilité macroéconomique. Nous concluons cette

section par un tour d'horizon de quelques évaluations empiriques de cette hypothèse. La littérature est loin d'être unanime sur le sujet. Par exemple, Johnson (2002) montre que, dans les pays développés, les anticipations d'inflation à long terme sont mieux ancrées en régime de ciblage de l'inflation. Andersson & Hofmann (2010) concluent à un résultat similaire en Nouvelle Zélande, en Suède et en Norvège, trois pays phares du ciblage de l'inflation. Au sein de la zone euro, durant la décennie 2000, Demertzis et al. (2010) observent une baisse de la corrélation entre l'inflation effective et l'inflation anticipée, suggérant que la banque centrale a réussi à ancrer de manière crédible et durable les anticipations d'inflation du public sur la cible. Weber (2007) étudie les anticipations d'inflation dans cinq pays de la zone euro : alors que les anticipations des experts de ces pays tendent à converger vers la cible d'inflation annoncée par la BCE, ce résultat ne se confirme pas pour les sondages concernant les ménages. Cecchetti & Hakko (2010), quant à eux, ne parviennent à extraire aucune baisse significative de la dispersion des anticipations d'inflation privées dans les pays qui ciblent l'inflation. Ils ne parviennent pas à mettre en évidence la rôle coordinateur de la cible. Par ailleurs, Levin et al. (2004) montrent que l'inflation est moins persistante dans les pays ayant adopté ce régime, les effets des chocs sur l'inflation étant ainsi limités. Pétursson (2010) montre que le ciblage de l'inflation a un effet négatif sur la variabilité de l'inflation. Au contraire, Lin & Ye (2007) et Berument & Yuksel (2007) ne parviennent pas à établir cet impact de manière significative. Néanmoins, l'évaluation empirique plaide largement pour une plus grande transparence de manière générale (Eijffinger & van der Cruijsen (2007)) : la politique monétaire est rendue moins incertaine. Les agents peuvent alors mieux l'anticiper, ce qui permet de rendre le canal primordial des anticipations plus efficace. Les effets particuliers d'un régime du ciblage de l'inflation sont par contre plus difficilement identifiables. En ce sens, Walsh (2009) conclut à un bilan au moins non-négatif du ciblage.

Les modèles, ainsi que les évaluations empiriques mentionnés dans cette section tendent à défendre une conduite transparente, du moins partiellement de la politique monétaire, tant en ce qui concerne l'objectif que les prévisions de la banque centrale. Dans ces modèles, l'apprentissage des agents se trouve limité à enrichir et à parfaire leur ensemble d'informations. ?, par exemple, n'y fait référence qu'en tant que "*a gradual increase of the public and the private signal precision over time*". Les problèmes de coordination des agents se trouvent résolus dès que l'information pertinente est révélée publiquement et devient alors connaissance commune. La dernière section propose une revue des travaux récents qui abordent explicitement le ciblage de l'inflation en relâchant ces hypothèses. Cette ligne de recherche tranche en faveur d'une politique monétaire très transparente.

## IV La transparence dans un contexte d’apprentissage

Blinder et al. (2008) et Svensson (2009) suggèrent que la transparence trouverait une justification renforcée si les agents ne sont pas dotés d’anticipations rationnelles mais sont au contraire engagés dans un processus d’apprentissage. Orphanides & Williams (2007) expliquent que la *raison d’être* des stratégies de ciblage de l’inflation, conjuguant annonce d’une cible numérique explicite de taux d’inflation et communication renforcée avec le public, vient du fait que les agents ne forment pas des anticipations rationnelles au sens de Muth (1961), c’est-à-dire des anticipations cohérentes avec le vrai modèle de l’économie ("*model-consistent*"). Ils ont au contraire besoin d’apprendre sans cesse ("*perpetual learning*") sur leur environnement pour améliorer leurs anticipations des variables pertinentes qui les guident dans leurs prises de décisions économiques. Communication et apprentissage sont donc étroitement liés. La conception théorique des régimes de ciblage de l’inflation s’affranchit alors d’une modélisation fondée sur les anticipations rationnelles pour appréhender les effets macroéconomiques de ces régimes *via* l’apprentissage des agents.

### IV.1 Faciliter l’apprentissage des agents grâce à un régime de ciblage de l’inflation

L’apprentissage est généralement introduit en faisant l’hypothèse que les agents ne connaissent pas le vrai modèle de l’économie (par exemple la valeur des paramètres des équations (1.6), (1.10) et (1.1)) mais doivent en estimer les paramètres, comme des économètres (Sargent (1999)). Leurs estimations sont mises à jour chaque période en fonction des nouvelles données qu’ils reçoivent (les observations de l’inflation, de l’écart de production et du taux d’intérêt). Ces algorithmes d’apprentissage sont basés sur les moindres carrés. La littérature qui s’est intéressée à l’introduction de ces dynamiques d’apprentissage pour l’analyse de la politique monétaire ne s’est d’abord pas attachée au rôle de l’annonce d’une cible ou de la transparence en général. Elle vise à évaluer quelles formes de règles (du type (1.1) ou (1.5) par exemple) permettent aux agents, et à quelles conditions, d’apprendre le vrai modèle de l’économie et de former des anticipations compatibles avec, autrement dit permettent la convergence vers l’équilibre en anticipations rationnelles (voir Evans & Honkapohja (2001), Bullard & Mitra (2002)). Le ciblage de l’inflation n’est traduit que par une règle du type (1.1).

Nous choisissons de développer le modèle d’Orphanides & Williams (2005) car il apporte sur ce point une contribution notable. Ce modèle illustre la manière dont le ciblage de l’inflation facilite l’apprentissage des agents et permet une meilleure stabilisation macroéconomique. Supposons une

économie caractérisée par la fonction d'offre suivante :

$$\pi_{t+1} = \phi E_t(\pi_{t+1}) + (1 - \phi)\pi_t + \alpha x_{t+1} + e_{t+1} \quad (1.27)$$

avec  $0 \leq \phi \leq 1$  traduisant le degré de persistance de l'inflation et  $e$  un choc  $idN(0, \sigma_e^2)$ . L'écart de production est fixé par la banque centrale  $x^I$ , sujet à une erreur de contrôle  $u$ ,  $idN(0, \sigma_u^2)$  comme suit :

$$x_{t+1} = x_t^I + u_{t+1} \quad (1.28)$$

La banque centrale fixe  $x$  pour minimiser la fonction de perte suivante :

$$L = (1 - w)Var(x) + wVar(\pi - \pi^T) \quad (1.29)$$

avec  $w \in [0, 1]$  la préférence pour la stabilisation de l'inflation et  $Var(\cdot)$  la variance. La réaction de la banque centrale peut s'écrire en termes d'écart des objectifs vis-à-vis de leur cible :

$$x_t = \theta(\pi_t - \pi^T) \quad (1.30)$$

avec  $\theta > 0$  la réponse de l'écart de production à l'écart entre l'inflation et sa cible.  $\theta$  caractérise la politique monétaire dans le modèle : plus  $\theta$  est élevé, plus la banque centrale réagit fortement aux déviations de l'inflation à sa cible.

Orphanides & Williams (2005) comparent trois mécanismes de formation des anticipations des agents. Le premier correspond au référentiel des anticipations rationnelles : les anticipations des agents sont cohérentes par rapport au modèle économique. Étant donné (1.27) et (1.30), les anticipations des agents sont alors données par :

$$E_t(\pi_{t+1}) = \frac{\alpha\theta}{1 - \phi}\pi^T + \frac{1 - \phi - \alpha\theta}{1 - \phi}\pi_t \quad (1.31)$$

En remplaçant (1.31) dans (1.27), on a la dynamique de l'inflation à l'équilibre en anticipations rationnelles :

$$\pi_{t+1} = \frac{\alpha\theta}{1 - \phi}\pi^T + \frac{1 - \alpha\theta}{1 - \phi}\pi_t + e_{t+1} + \alpha u_{t+1} \quad (1.32)$$

Orphanides & Williams (2005) dérivent alors la politique monétaire optimale qui minimise (1.29) sous anticipations rationnelles :  $\theta_{RE}^* = \theta(w, \alpha, \phi)$ . En particulier,  $\theta_{RE}^*$  est croissant en  $w$  et décroissant en  $\phi$ .

Dans le second cas, les agents ont une connaissance imparfaite du modèle de l'économie. Ils ne

connaissent pas la valeur des paramètres structurels  $\pi^T$ ,  $\phi$  et  $\alpha$  mais connaissent la forme de (1.32). Pour former leurs anticipations d’inflation, ils estiment le modèle économétrique suivant :

$$\pi_t = c_{0,t} + c_{1,t}\pi_{t-1} + v_t \quad (1.33)$$

avec  $v$  un bruit blanc. Les coefficients  $c$  sont mis à jour en fonction des nouvelles observations période par période avec un algorithme des moindres carrés à gain constant :

$$c_t = c_{t-1} + \kappa R_t^{-1} X_t (\pi_t - X_t' c_{t-1}) \quad (1.34)$$

avec  $c_t \equiv (c_{0,t}, c_{1,t})'$ ,  $X_t \equiv (1, \pi_{t-1})'$ ,  $\kappa > 0$  le gain<sup>11</sup> et  $R$  la matrice de variances-covariances des estimateurs donnée par :

$$R_t = R_{t-1} + \kappa (X_t X_t' - R_{t-1}) \quad (1.35)$$

Lorsque les valeurs des coefficients  $c$  se rapprochent de leurs vraies valeurs  $\left(\frac{\alpha\theta}{1-\phi}\pi^T, \frac{1-\alpha\theta}{1-\phi}\right)$  données par (1.32), le processus d’apprentissage converge vers l’équilibre en anticipations rationnelles. On note  $\theta_{LS}^*$  la politique monétaire optimale dans cette configuration.

Le troisième cas est identique au second à l’exception du fait que la banque centrale annonce la valeur de la cible  $\pi^T$  aux agents. L’annonce de la cible diminue l’incertitude des agents sur le modèle de l’économie et le modèle de prévision des agents (1.33) est simplifié et s’écrit<sup>12</sup> :

$$\pi_t - \pi^T = c_{1,t}(\pi_{t-1} - \pi^T) + v_t \quad (1.36)$$

Et les agents estiment  $c_1$  comme précédemment et forment les anticipations :

$$E_t(\pi_{t+1}) = \pi^T + c_{1,t}(\pi_t - \pi^T). \quad (1.37)$$

Notons  $\theta_T^*$  la réaction optimale dans ce cas.

Orphanides & Williams (2005) obtiennent deux résultats majeurs. D’une part, la stabilisation de l’économie est meilleure lorsque les agents forment des anticipations rationnelles. Ce résultat est dû au fait que l’apprentissage introduit une auto-corrélation positive de l’inflation et prolonge la réponse de l’inflation face aux chocs  $e$  et  $u$ . Ce mécanisme introduit un biais. La banque centrale doit prendre

11. L’algorithme à gain constant considère que les agents ont une mémoire finie, les observations anciennes pèsent moins dans l’estimation des paramètres que les observations les plus récentes. C’est un moyen de détecter les changements structurels dans la valeur des paramètres et de modéliser un apprentissage perpétuel.

12. Ceci revient à imposer que la constante du modèle soit nulle et à diminuer le nombre de paramètres à estimer.

en compte cet effet en réagissant plus fortement aux écarts de l'inflation à sa cible, i.e.  $\theta_{LS}^* > \theta_{RE}^*$ , au détriment de la stabilisation du produit. Nous appelons cet effet le "biais d'apprentissage". D'une manière générale, les auteurs montrent que plus  $\theta$  est élevé, plus les anticipations des agents formées par (1.33) sont proches des anticipations rationnelles. D'autre part, les perturbations liées à l'apprentissage sont plus limitées lorsque la banque centrale annonce sa cible (i.e. les agents forment leurs anticipations avec (1.37)) que dans le cas où ils apprennent sans la connaissance de la cible (équation (1.33)). Dans ce cas, la banque centrale peut se rapprocher des performances sous anticipations rationnelles au prix d'une réaction moins forte à l'inflation, i.e. on a :  $\theta_{RE}^* < \theta_T^* < \theta_{LS}^*$ . En d'autres termes, sous apprentissage, la banque centrale stabilise l'inflation à moindre coût en terme de stabilisation du produit lorsqu'elle annonce sa cible. Ce résultat s'obtient car l'annonce de la cible d'inflation réduit l'incertitude sur le modèle estimé des agents (il se simplifie de la forme (1.33) à (1.37)) et facilite leur apprentissage du vrai modèle de l'économie. Leurs anticipations d'inflation se rapprochent alors de celles qu'ils formeraient s'ils étaient dotés d'anticipations rationnelles et limitent le biais introduit par l'apprentissage. De ce fait, le modèle d'Orphanides & Williams (2005) apporte un soutien analytique aux stratégies de ciblage de l'inflation dans leur objectif premier de fournir un ancrage nominal aux agents.

Orphanides & Williams (2007) intègrent à ce modèle l'apprentissage des autorités monétaires. La banque centrale ne connaît pas la valeur des taux d'intérêt et de chômage naturels et doit les estimer par un algorithme économétrique. Ils montrent que les conclusions d'Orphanides & Williams (2005) sont renforcées : les performances de la politique monétaire sont détériorées par rapport au cas avec anticipations rationnelles à cause des effets conjugués des erreurs d'estimation de la banque centrale et des agents. L'annonce d'une cible permet de mitiger ces effets. Associée à l'adoption d'une règle en différences (du type  $\Delta i_t = \theta_\pi(\pi^e - \pi^T) + \theta_u \Delta u$ , avec  $u$  le taux de chômage), qui ne requiert pas l'estimation des taux naturels et implique moins de paramètres, la banque centrale élimine pratiquement le biais d'apprentissage. L'économie se rapproche des performances sous anticipations rationnelles.

Dans un contexte similaire, dans lequel les agents et la banque centrale connaissent de manière imparfaite le modèle de l'économie et ont recours à un apprentissage économétrique pour l'estimer, Dennis & Ravenna (2008) montrent que si un changement de la cible d'inflation n'est pas communiqué au public, la stabilisation macroéconomique peut se détériorer de manière importante. D'autres travaux soulignent l'apport de la transparence d'un régime de ciblage de l'inflation, pas strictement limitée à l'annonce de la cible, dans un contexte d'apprentissage adaptatif. Brzoza-Brzezina & Kot (2008) utilisent un modèle Nouveau Keynésien dans lequel les agents estiment les dynamiques des variables macroéconomiques avec un modèle VAR. Ils montrent que la publication des projections de la banque

centrale de la production et des taux d’intérêt futurs réduit l’asymétrie d’informations entre la banque centrale et les agents et améliore la stabilisation macroéconomique. Avec des hypothèses très proches, Eusepi (2005) montre que l’économie est déstabilisée par des fluctuations causées par le désancrage des anticipations des agents. Les mouvements dans le taux d’intérêt doivent être plus fréquents et plus forts pour limiter la variabilité de l’inflation et de l’écart de production. Si la banque centrale révèle la règle de politique monétaire aux agents (une fonction de réaction de la forme de (1.1)), elle limite le biais introduit par l’apprentissage. L’auteur suggère aussi que dévoiler les prévisions de taux d’intérêt aux agents peut s’avérer nécessaire pour stabiliser les anticipations si les modèles d’estimation des agents et de la banque centrale diffèrent (i.e. si ils apprennent selon des modèles du type (1.34) - (1.35) dans lesquels la matrice  $X$  ne contient pas les mêmes variables). Dans un modèle de la même veine, Eusepi & Preston (2010) incluent la possibilité d’anticipations d’inflation auto-réalisatrices qui peuvent déstabiliser l’économie dès qu’elles sont éloignées des objectifs de la banque centrale. Les agents ne connaissent pas le modèle de l’économie mais estiment les dynamiques de l’inflation, du taux d’intérêt et de l’écart de production par un modèle VAR. Les estimations des agents influencent ensuite la réalisation de ces variables et ils utilisent la valeur de ces variables pour mettre à jour leur modèle de prévision : le système est auto-référentiel. Ils montrent dans ce contexte que l’annonce seule de la cible n’affine pas suffisamment les anticipations des agents pour qu’ils apprennent le modèle de l’économie. Le système converge vers l’équilibre en anticipations rationnelles si la banque centrale est de surcroît transparente sur le processus de fixation du taux d’intérêt, soit en révélant la règle de politique monétaire exacte (variables et valeurs des coefficients) soit en révélant au moins la forme de la règle (variables incluses).

Les travaux cités ont cependant recours à l’apprentissage économétrique, qui est la forme privilégiée d’apprentissage dans les modèles dévolus à l’analyse de la politique monétaire. Très peu de contributions questionnent les apports d’un régime de ciblage de l’inflation lorsque les agents adoptent d’autres types de mécanismes d’anticipation, qui les éloignent davantage des anticipations rationnelles. Nous les recensons maintenant.

## IV.2 Le ciblage de l’inflation comme une routine

Cette littérature postule que les agents ont recours à de simples règles – ou routines ou heuristiques – pour former leurs anticipations. Cette littérature s’appuie sur trois idées (voir Hommes (2006) pour une revue) : l’idée de Keynes selon laquelle des fluctuations dans les sentiments peuvent influencer les conditions macroéconomiques ; les travaux de Simon (1971) qui montrent que les agents sont dotés de rationalité procédurale et que leurs limites cognitives et d’informations les empêchent de

résoudre des problèmes sophistiqués d'optimisation ; et les travaux récents en psychologie ou en finance comportementale (Kahneman (2003)). Par exemple, Leiser & Aroch (2008) montrent que les agents ont tendance à séparer les variables économiques en deux ensembles : les variables jugées "bonnes" – comme la production – et les variables jugées "mauvaises" – comme le chômage ou l'inflation. Ils forment alors des anticipations binaires : si une "bonne" variable augmente, les conditions économiques sont favorables et inversement.

Dans le cadre d'un régime de ciblage de l'inflation, la cible annoncée aux agents permet de simplifier la perception qu'ils ont de la politique monétaire. En effet, l'environnement économique est complexe et ils en ont une connaissance limitée. King (2005) propose alors d'utiliser de simples règles de conduite, ou heuristiques, rapides et économies en informations pour les agents. La cible permet de créer une heuristique. Par exemple, les banques centrales peuvent adopter une routine simple en temps normal – comme "fixer le taux d'intérêt tel que les prévisions d'inflation à deux ans soient égales à la cible" – et adapter cette routine en cas de chocs majeurs en différant le retour à la cible. C'est ainsi que King (2005) interprète la politique de ciblage de l'inflation de la banque d'Angleterre. Si il est peu probable empiriquement que les agents s'engagent dans des procédures complexes d'optimisation intertemporelle ou d'estimation économétrique, la banque centrale a intérêt à expliquer cette routine aux agents en révélant sa cible. Elle les incite ainsi à former leurs anticipations d'inflation selon une heuristique du type "l'inflation anticipée sera en moyenne égale à la cible, les déviations n'étant que temporaires". Il est alors plus facile pour la banque centrale d'ancrer leurs anticipations et ainsi de diminuer la volatilité macroéconomique. Faust & Henderson (2004) plaident pour une analyse similaire : *"Perhaps policy behavior is subject to a simplicity constraint that causes policymakers to follow rule-of-thumb-like policy. Public communication requires some simplification"*. Diron & Mojon (2008) rapportent quant à eux que l'utilisation de la cible annoncée par la banque centrale comme routine d'anticipations de l'inflation est plutôt robuste à différentes spécifications du modèle de l'économie.

La modélisation de De Grauwe (2011) lie explicitement régime de ciblage de l'inflation et "routinisation" des anticipations des agents dans un modèle Nouveau Keynésien, c'est pourquoi nous choisissons de le développer. L'économie y est représentée par la fonction d'offre (1.10), la courbe de demande agrégée (1.6) et une règle de la forme de (1.1). Les anticipations d'inflation et d'écart de production des agents dans (1.10) et dans (1.6) ne sont pas rationnelles mais résultent de routines. Il y a une proportion  $\alpha_t^{opt}$  d'agents optimistes dans l'économie et ces agents anticipent un écart de production positif, i.e.  $E_t^{opt}(x_{t+1}) = g > 0$ . Symétriquement, il y a une proportion  $\alpha_t^{pes} = 1 - \alpha_t^{opt}$  d'agents pessimistes qui anticipent un écart de production négatif, i.e.  $\hat{E}_t^{pes}(x_{t+1}) = -g < 0$ . L'anticipation moyenne dans (1.6) est donnée par la moyenne pondérée de ces deux anticipations,  $E_t(x_{t+1}) = \alpha_t^{opt} E_t^{opt}(x_{t+1}) + \alpha_t^{pes} E_t^{pes}(x_{t+1})$ .

Chacune de ces deux prévisions est évaluée sur la base de ses erreurs et sa performance est donnée par :

$$U_t^i = - \sum_{k=1}^{\infty} \omega_k [x_{t-k} - E_{t-k-1}^i(x_{t-k})]^2, i = \{opt, pes\} \quad (1.38)$$

avec  $\omega_k$  une suite de poids géométriquement décroissants. La proportion des agents optimistes est alors révisée à chaque période selon un mécanisme évolutionnaire. Si l’anticipation optimiste est plus proche de la réalité, le nombre d’optimistes augmente, on a :

$$\alpha_t^{opt} = \frac{\exp(\gamma U_t^{opt})}{\exp(\gamma U_t^{opt}) + \exp(\gamma U_t^{pes})} \quad (1.39)$$

avec  $\gamma$  un paramètre. De manière similaire, il y a une proportion  $\beta_t^{tar}$  d’agents qui croît à la cible d’inflation annoncée par la banque centrale et ancre son anticipation d’inflation dessus, i.e.  $E_t^{tar}(\pi_{t+1}) = \pi^T$  et une proportion  $\beta_t^{ext} = 1 - \beta_t^{tar}$  qui ont des anticipations naïves, i.e.  $E_t^{ext}(\pi_{t+1}) = \pi_{t-1}$ . La crédibilité de la cible  $\beta_t^{tar}$  est révisée selon la même formule donnée par (1.39) et l’anticipation agrégée d’inflation dans (1.10) et (1.6) vaut de même  $E_t(\pi_{t+1}) = \beta_t^{tar} E_t^{tar}(\pi_{t+1}) + \beta_t^{ext} E_t^{ext}(\pi_{t+1})$ . Lorsque  $\beta_t^{tar} < 1$ , la cible est imparfairement crédible.

Dans ce modèle, l’auteur observe un comportement cyclique du produit et de l’inflation : des vagues endogènes de pessimisme (caractérisées par un  $\alpha^{pes}$  proche de 1) et d’optimisme ( $\alpha^{opt}$  proche de 1) ainsi que des vagues de crédibilité ( $\beta^{tar}$  élevé) et de scepticisme ( $\beta^{ext}$  élevé) se succèdent. Ces mouvements créent de la persistance dans le processus de l’inflation et du produit absente en anticipations rationnelles. Ces vagues sont d’autant plus longues et l’inflation et le produit d’autant plus volatiles que les anticipations d’inflation sont mal ancrées sur la cible. En effet, l’inflation est alors plus volatile, la réaction de la banque centrale est plus agressive, au détriment de la stabilisation du produit. De Grauwe retrouve ainsi les conclusions d’Orphanides & Williams : plus la banque centrale mène une politique agressive de stabilisation de l’inflation, plus la cible est crédible et plus la cible est crédible, meilleures sont les performances de la politique monétaire.

Cependant, ce modèle se fonde sur les équations du modèle Nouveau Keynésien, qui résultent d’approximations log-linéaires aux alentours de l’équilibre en anticipations rationnelles. Ces relations ne sont valables que si les dynamiques des variables restent proches de leurs valeurs d’équilibre. Or, comme le notent McCallum (1997) ou Blinder (1998), c’est en cas de choc majeur, c’est-à-dire lorsque l’économie est emmenée trop loin de l’équilibre que le canal de la communication devient le plus important. Canzian (2009, chap 4.) développe ainsi un modèle sans microfondement. Les anticipations d’inflation y sont influencées par le "sentiment de marché". Dans le cas où la banque centrale n’annonce pas de cible d’inflation, les agents tendent à devenir pessimistes si l’inflation augmente et inversement.

Si la banque centrale annonce une cible explicite, les agents tendent à être optimistes si la banque centrale contient l'inflation près de la cible et inversement. Il montre que les anticipations d'inflation des agents sont mieux ancrées et moins volatiles si la cible est connue. En effet, la cible fournit un point de repère fixe pour évaluer l'inflation alors qu'en l'absence d'une cible, les agents ne disposent que des changements de l'inflation pour déterminer leurs anticipations. En conséquent, un régime de ciblage de l'inflation stabilise mieux l'économie. Brazier et al. (2008) utilisent un modèle à générations imbriquées. Les anticipations d'inflation des agents sont formées de la même manière que dans le modèle de De Grauwe (2011) ci-dessus et leur modèle génère des dynamiques proches de celui-ci. En particulier, l'annonce de la cible permet de diminuer la volatilité des anticipations d'inflation et par là de l'inflation elle-même.

Il semble ainsi que l'apprentissage des agents comme des autorités monétaires plaide très fortement en faveur d'une plus grande transparence de la conduite de la politique monétaire.

## Conclusion

L’émergence puis les développements des régimes de ciblage de l’inflation ont été de nature essentiellement empirique. Dans un premier temps, on peut penser que l’annonce d’une cible d’inflation explicite a permis aux banques centrales de devenir crédibles sur leur engagement en matière de stabilité des prix. L’annonce d’une cible d’inflation a pu permettre de verrouiller les anticipations d’inflation des agents sur un taux ciblé faible. Dans un second temps, la transparence économique accrue du processus de décision de politique monétaire imposée par un régime de ciblage de l’inflation semble avoir fourni un cadre cohérent pour orienter les anticipations des agents. La modélisation des régimes de ciblage de l’inflation dans la littérature académique semble avoir évolué selon ces deux lignes. C’est ce dont cette revue a tenté de rendre compte. Jusqu’au début des années 2000, le ciblage de l’inflation est justifié dans le cadre théorique de l’incohérence temporelle comme une parade au biais inflationniste : il incite la banque centrale à ne plus surprendre le public et lui permet de crédibiliser son engagement sur une règle optimale. Ce cadre théorique a petit à petit été délaissé pour s’inscrire dans le paradigme actuel qui reconnaît la conduite des anticipations comme le canal fondamental de transmission de la politique monétaire. La banque centrale a alors intérêt à rendre sa politique prédictible pour les agents. L’annonce de la cible d’inflation ainsi que la transparence requise par les régimes de ciblage de l’inflation permettent de guider les anticipations des agents. Des anticipations mieux ancrées limitent à leur tour la volatilité macroéconomique. Pour en rendre compte, les modèles théoriques ont introduit successivement deux hypothèses : l’existence d’asymétrie d’information entre les agents privés et la banque centrale puis la connaissance imparfaite du vrai modèle de l’économie. Cette dernière hypothèse induit que les agents ne peuvent pas former des anticipations rationnelles, dans le sens d’anticipations compatibles avec le modèle de l’économie. La transparence, tant sur les objectifs, les prévisions et l’analyse de la banque centrale permet de réduire cette asymétrie d’information, de mieux coordonner les croyances et ainsi les décisions des agents et de faciliter leur apprentissage du modèle. Les éléments empiriques plaident globalement en faveur d’une transparence accrue de la conduite de la politique monétaire. Cependant, le bénéfice de la transparence dans la réduction de l’asymétrie d’information fait débat dans la littérature théorique. En revanche, le relâchement de l’hypothèse d’anticipations rationnelles et son corollaire – l’introduction de l’apprentissage – réhabilitent les bienfaits de la transparence dans les travaux théoriques. Cette piste semble prometteuse, d’autant plus que la crise financière de 2008 a remis en cause plusieurs hypothèses sur lesquelles reposent les modélisations de la politique monétaire, en particulier l’hypothèse d’anticipations rationnelles et d’individu représentatif optimisateur (Trichet (2010)). La modélisation devrait prendre davantage en compte des mécanismes plus riches de formation des anticipations et les enjeux liés à la coordination

d'agents hétérogènes (Delli Gatti et al. (2010)). Dans ce contexte, les propriétés d'un régime de ciblage de l'inflation pourraient trouver de nouvelles justifications.

A ce titre, le travail de thèse se poursuit maintenant par la présentation de la modélisation en termes de systèmes complexes que nous mobilisons pour l'analyse du ciblage de l'inflation.



CHAPITRE 2

# **Construction d'un Modèle à Base d'Agents pour l'Analyse de la Politique Monétaire**

---

## Sommaire

---

Introduction . . . . .	49
I      Vue d'ensemble de la modélisation à base d'agents en économie . . . . .	53
I.1    L'économie à base d'agents : l'économie comme un système complexe adaptatif . . . . .	53
I.2    Pourquoi une économie à base d'agents pour modéliser un régime de ciblage de l'inflation ? . . . . .	57
I.3    Les résultats des modèles à base d'agents peuvent-ils être considérés comme robustes ? . . . . .	61
II     Le socle de départ : le modèle Nouveau Keynésien de base . . . . .	68
II.1   Comportement des ménages . . . . .	69
II.2   Comportement des firmes . . . . .	74
II.3   Comportement des autorités monétaires . . . . .	77
II.4   Equilibres . . . . .	78
II.5   Chocs et ajustements . . . . .	80
III    Elaboration du modèle conceptuel . . . . .	85
III.1   Comportement des ménages . . . . .	87
III.2   Comportement de la firme . . . . .	98
III.3   Comportement des autorités monétaires . . . . .	101
III.4   Agrégation et rationnement des marchés . . . . .	102
III.5   Chocs et ajustements . . . . .	104
Conclusion . . . . .	109

---

## Introduction

**A**U COURS DE ces deux dernières décennies, les modèles dits modèles dynamiques stochastiques d'équilibre général (DSGE) se sont imposés comme le cadre privilégié de l'analyse macroéconomique. Les travaux théoriques, dans la lignée Nouvelle Keynésienne, y ont largement recours, notamment pour étudier les liens entre monnaie, inflation et cycle des affaires ou évaluer les conséquences en termes de stabilisation macroéconomique de différentes politiques monétaires (voir le traité fondateur de Woodford (2003b)). Les banques centrales, qu'elles soient en ciblage de l'inflation ou non, les utilisent aussi largement (Tovar (2009)). Il s'agit de modèles d'optimisation intertemporelle microfondés dans un cadre d'équilibre général dynamique hérité des modèles de cycles réels, dans lequel des chocs sont introduits (Gali (2001)). Ces modèles intègrent des éléments Keynésiens, notamment un cadre de non-flexibilité parfaite des prix et un produit déterminé par la demande. Ces modèles fournissent indiscutablement un cadre d'analyse cohérent et autonome, qui s'est avéré robuste aux critiques auxquelles faisaient face les modèles macroéconométriques précédents, notamment la critique de Lucas (1976). Ils offrent ainsi une meilleure compréhension du comportement d'une économie décentralisée soumise à des chocs. Ils permettent notamment d'établir les propriétés stabilisatrices des règles de politique monétaire et d'exclure celles qui mènent à une volatilité excessive des variables endogènes (Woodford (2003b)). Cependant, ce cadre d'analyse n'est pas sans limite, la plus forte a trait sans doute aux capacités cognitives dont sont supposés être dotés les agents de ces modèles (De Grauwe (2011)) : ceux-ci connaissent et intègrent parfaitement le modèle sous-jacent de l'économie et sont dotés d'*anticipations rationnelles*. En conséquence, ils utilisent la structure du modèle pour prendre leurs décisions économiques et former leurs prévisions des variables pertinentes pour ces décisions. Comme il a été discuté au chapitre précédent, dans ces circonstances, l'apport que constitue la connaissance de la cible d'inflation est discutable (King (2005), Blinder et al. (2008), Svensson (2009), Delli Gatti et al. (2010) entre autres). De plus, le fait que tous les agents adoptent ce comportement optimisateur en possession de la même information et des mêmes attributs amène à l'hypothèse d'*agent représentatif* : l'économie est peuplée d'un grand nombre d'agents supposés identiques, et les problèmes d'agrégation du niveau micro au niveau macro sont ainsi évacués. En conséquence, les décisions des agents du modèle sont prises de manière à se coordonner entre elles, il n'y a alors pas de demande ou d'offre excédentaire, les problèmes de coordination sont résolus et les marchés sont toujours à l'équilibre. Il en découle une vision de la dynamique économique centrée sur le concept d'*équilibre*, en particulier celui d'*équilibres en anticipations rationnelles*, qui désigne une situation caractérisée par une correspondance parfaite entre les anticipations des agents et la vraie loi qui gouverne la dynamique de l'économie. La dynamique macroéconomique fluctue ainsi autour de cet équilibre du modèle sous l'eff-

fet de perturbations exogènes supposées de faible ampleur. Ces hypothèses sont imposées en réponse à la grande complexité analytique de ce type de modèles et s'avèrent nécessaires à leur résolution. Néanmoins, elles peuvent apparaître discutables au regard des études empiriques et expérimentales (voir notamment la littérature initiée par Kahneman & Tversky (1973) et Simon (1996, Chap. 3 et 4)).

Des extensions proposent cependant des versions des modèles analytiques moins exigeantes en termes de rationalité, en faisant notamment appel à l'apprentissage économétrique (voir en particulier Sargent (1993)). Le chapitre précédent en a fait une mention extensive dans le cadre de l'analyse des régimes de ciblage de l'inflation (voir en particulier les travaux de Orphanides & Williams (2005, 2007), Eusepi & Preston (2010) et Dale et al. (2011)). Comme exposé à la section IV du chapitre 1, ces travaux montrent tous que relâcher l'hypothèse d'anticipations rationnelles, même si il ne s'agit que d'un écart modeste vis-à-vis des modèles traditionnels, n'est pas anodin et entraîne des perturbations significatives de la capacité de la banque centrale à stabiliser l'économie. Néanmoins, même dans ces versions assouplies du cadre analytique traditionnel, les agents sont le plus souvent encore dotés de capacités cognitives sophistiquées. A cet égard, les récentes contributions que nous avons recensées à la sous-section IV.2 du chapitre 1 constituent une avancée particulière, car elles modélisent des agents qui utilisent des règles heuristiques, inspirées de mécanismes évolutionnaires très simples, pour prévoir les variables pertinentes pour leurs décisions économiques. Ces contributions éclairent de manière intéressante et originale la façon dont l'annonce d'une cible d'inflation peut limiter la volatilité macroéconomique supplémentaire introduite par le relâchement de l'hypothèse d'anticipations rationnelles.

Dans ce travail de thèse, nous ambitionnons d'adopter une approche plus radicale, dans laquelle non seulement les prévisions des agents mais aussi leurs décisions microéconomiques seraient le fruit d'heuristiques. Il en résulte un modèle microfondé, robuste à la critique de Lucas en particulier, mais dans lequel les agents n'ont qu'une connaissance limitée de l'environnement dans lequel ils évoluent et par conséquent, sont incapables de former des anticipations rationnelles et de parvenir à des comportements optimaux. En général, les individus n'ont pas les capacités d'intégrer la complexité de la totalité des informations qu'ils reçoivent et de les utiliser pour en déduire l'action optimale. Ils ont plutôt recours à des règles simples, des *heuristiques*, pour guider leurs comportements, d'une manière adaptative, vers l'accomplissement de leur objectif. Ils sont dotés d'une *rationalité limitée* (Simon (1971)). Comme l'explique De Grauwe (2011), "*they do this not because they are irrational, but rather because the complexity of the world is overwhelming. In a way it can be said that using heuristics is a rational response of agents who are aware of their limited capacity to understand the world*". Le cadre

d'analyse que nous développons permet de faire cohabiter et interagir apprentissage, hétérogénéité, incertitude sur le modèle de l'économie et communication de la banque centrale. Cependant, une telle démarche soulève des problèmes en termes de tractabilité : l'obtention d'une solution analytique devient pour le moins compromise, si ce n'est impossible. Nous proposons alors un type de modélisation alternatif qui permet de s'affranchir des contraintes analytiques des modèles DSGE et de s'écartier de leurs hypothèses cognitives : la *modélisation* dite *à base d'agents* ou multi-agents. Les propriétés de ce type de modèles semblent en effet tout à fait en phase avec les limites des modèles DSGE. Les modèles à base d'agents permettent notamment de représenter l'économie comme un *système complexe adaptatif* (Holland & Miller (1991)) dans lequel une collection d'agents hétérogènes interagissent de manière répétée selon des règles de comportement heuristiques, c'est-à-dire non-optimisées (Tesfatsion (2006b)). Les agents ne sont donc pas dotés d'anticipations rationnelles et les marchés n'ont aucune raison d'être à l'équilibre *a priori* puisque les stratégies des agents ne coïncident pas nécessairement entre elles. De ces interactions locales émergent des dynamiques macroéconomiques, on parle de forces *bottom-up*. Ainsi, ces modèles disposent de microfondements cohérents sans passer par des hypothèses d'agrégation fortes (Page (2004), Lengnick (2011)). Ils sont caractérisés par l'absence de solutions analytiques de forme réduite en raison des non-linéarités et du caractère aléatoire des décisions des agents et de leurs interactions (Dosi et al. (2010)). Les résultats de ce type de modèle s'obtiennent alors par simulation informatique.

L'utilisation des modèles à base d'agents pour l'analyse macroéconomique est récente et l'avancement des travaux de recherche dans ce domaine en est plutôt au stade embryonnaire. Outre les contributions de Canzian (2009) et De Grauwe (2011) discutées au chapitre 1, une dizaine d'autres dans cette veine ont très récemment été développées. Nous nous inspirons des mécanismes qu'elles retiennent pour construire notre modèle. Ces contributions visent davantage à montrer l'émergence endogène de cycles des affaires. A ce sujet, nous pouvons citer Gaffeo et al. (2008), Dosi et al. (2010), Oeffner (2008), Mandel et al. (2010) ou Lengnick (2011) ou le projet EURACE. Ce dernier diffère quelque peu des autres contributions citées car il s'agit d'un modèle *large-scaled* développé en partenariat entre plusieurs unités de recherche européennes pour obtenir une plateforme de simulation capable de servir de laboratoire pour la mise en oeuvre de politiques dans l'Union Européenne<sup>1</sup>. La thèse de doctorat de Oeffner (2008) constitue sans nul doute notre référence la plus proche, tant sur l'objet d'étude – un modèle à base d'agents macroéconomique d'équilibre général avec un canal de la consommation de la politique monétaire – que sur la méthode – une transparence totale quant aux problèmes rencontrés, aux solutions apportées et un processus de validation solide, appuyée sur des

1. Les détails du projet peuvent être consultés à l'adresse suivante :  
<http://www.wiwi.uni-bielefeld.de/vpl1/projects/eurace.html>

outils issus des sciences de l'ingénieur.

Par ailleurs, ces contributions intègrent une banque centrale mais la politique monétaire n'est qu'une composante du modèle (*via* une règle de Taylor contemporaine dans le modèle d'Oeffner (2008) et *via* des politiques quantitatives dans le modèle EURACE, voir Raberto et al. (2010)) et ne fait pas l'objet central de l'analyse. Peu de modèles macroéconomiques à base d'agents sont construits à cet effet. Les publications de Raberto et al. (2007, 2008) étudient les conséquences d'une règle de politique monétaire qui réagit à l'écart entre la production et son plafond potentiel. Elles montrent qu'une règle trop agressive peut, sous certaines conditions, déstabiliser l'économie. Brunn (2007) développe un modèle simple dans lequel la banque centrale réagit à la masse monétaire ou au prix des actions. Elle conclut qu'aucune de ces deux règles ne parvient à stabiliser le cycle des affaires. Ashraf & Howitt (2012) montrent les effets néfastes associés à une inflation forte dans ce type de modèles et Ashraf et al. (2011) pointent les limites des règles macroprudentielles dans un contexte de crise. A notre connaissance, la modélisation à base d'agents n'a pas été utilisée pour évaluer les effets de l'annonce d'une cible ou de la politique de transparence d'une banque centrale.

Même si ce type de modélisation présente des attraits évidents pour l'analyse macroéconomique, ses apports normatifs sont jusque là limités, dans la mesure où il est difficile d'en extraire des recommandations unifiées en termes de politique économique. C'est pourquoi nous ne prétendons pas avoir trouvé *la* solution aux limites du cadre d'analyse traditionnel mais les caractéristiques des modèles à base d'agents nous apparaissent en faire un bon candidat pour tenter d'en dépasser certaines. Nous pouvons ainsi raisonnablement espérer que cette démarche puisse déboucher sur des apports enrichissants. Ces modèles restent minoritaires en économie mais sont largement utilisés dans d'autres domaines scientifiques, tels que la biologie, la recherche sur le cerveau, la logistique... Nous pouvons ainsi emprunter des éléments de méthode et d'analyse à d'autres disciplines, ce qui, indéniablement, contribue à faire un pont enrichissant entre le travail des économistes et celui d'autres branches de la science et apporte une rigueur supplémentaire à notre démarche.

Comme le fait remarquer De Grauwe (2011), modéliser des heuristiques requiert de la discipline pour éviter le "*everything becomes possible*", car contrairement au paradigme des anticipations rationnelles, il n'existe aucun consensus ou cadre d'analyse unifié de la rationalité limitée. Nous adoptons alors une démarche issue des sciences de l'ingénieur, consistant en deux étapes. La première consiste à obtenir un modèle, dit *conceptuel*. Il contient les ingrédients que l'on souhaite intégrer au modèle, ainsi que les hypothèses retenues et leurs justifications, soit d'ordre empirique, théorique ou computationnel (voir Klügl (2008)). Ici, nous voulons développer une économie composée au moins d'un marché du travail et d'un marché des biens sur lesquels des agents (ménages et firmes) interagissent. Les agents

doivent être dotés d'anticipations qui jouent en retour sur le comportement du modèle. Il doit aussi y avoir une influence de la banque centrale sur l'évolution des prix et l'activité économique *via* la fixation du taux d'intérêt nominal. Ce modèle conceptuel est fortement inspiré du modèle Nouveau Keynésien de base. Une fois cette étape franchie, nous entrons dans le processus de validation du modèle (seconde étape), qui se trouve au chapitre suivant.

Le présent chapitre est organisé comme suit : la section I fournit un éclairage critique sur la modélisation à base d'agents, la section II dérive le modèle Nouveau Keynésien de base, qui constitue notre socle de départ dans la construction du modèle à base d'agents. La section III explicite le modèle conceptuel construit en insistant sur ses liens et ses divergences avec le modèle NK de base.

## I    Vue d'ensemble de la modélisation à base d'agents en économie

Nous organisons ce tour d'horizon de la modélisation à base d'agents appliquée à l'économie comme suit : nous en donnons une définition générale et soulignons les apports que cette méthode peut fournir à l'analyse (macro)économique, notamment en comparaison des modèles analytiques, tout en exposant aussi ses limites et les critiques auxquelles elle s'expose. Nous décrivons ensuite le processus par lequel un modèle à base d'agents peut être construit. A chaque fois, nous illustrons le propos avec des exemples tirés du modèle que nous proposons dans la section suivante. Cette section ne se veut pas exhaustive, elle a seulement pour ambition de fournir aux lecteurs des clés de lecture qui peuvent s'avérer utiles à la compréhension et à l'évaluation de la suite du travail de thèse<sup>2</sup>.

### I.1 L'économie à base d'agents : l'économie comme un système complexe adaptatif

*Agent-based computational economics (ACE) is the computational study of economies modeled as evolving systems of autonomous interacting agents. Thus, ACE is a specialization to economics of the basic complex adaptive systems paradigm.* (Tesfatsion (2003, p. 262))

En reprenant Holland & Miller (1991), un système complexe est un système i) composé d'*unités en interaction* ; ii) qui donne lieu à des propriétés *agrégées* qui *émergent*, i.e. des propriétés produites

---

2. Pour un traitement plus complet des modèles à base d'agents en économie, le lecteur peut se reporter au site internet de Leigh Tesfatsion <http://econ2.econ.iastate.edu/tesfatsi/amulmark.htm> et aux contributions rassemblées dans Tesfatsion & Judd (2006). Les thèses de Oeffner (2008) et Canzian (2009) contiennent aussi des expositions récentes et concises des modèles à base d'agents, de leurs propriétés et de leurs attraits.

par l'interaction de ces unités mais qui ne sont pas des propriétés de ces unités en elles-mêmes prises individuellement, on parle de forces *bottom-up*. Par ailleurs, iii) le comportement agrégé d'un système complexe peut être décrit sans une connaissance détaillée des interactions entre les unités individuelles. Le système est dit de plus adaptatif si les unités qui le composent sont *réactives*, i.e. capables d'adapter leurs comportements en réaction à un changement de leur environnement. Cette adaptation doit être *orientée vers un objectif*, c'est-à-dire que les unités dirigent leurs réactions vers la réussite d'un objectif. Ces approches sont très courantes dans des domaines tels que la médecine, la biologie, la logistique, l'étude du climat... Dans ces disciplines, les simulations informatiques et les expérimentations sont des outils largement répandus et reconnus comme valables.

Cependant, ce n'est pas le cas en sciences économiques et particulièrement en macroéconomie, comme l'explique Axel Leijonhufvud : "*The macroeconomics of the last century, from Lucas through Prescott to Woodford, has been strongly wedded to stochastic general equilibrium theory. It is the well-developed knowledge base with the last couple of generations of macroresearchers have been equipped*" (Leijonhufvud (2006, p. 1627)). En effet, ces dernières décennies de recherche se sont attachées à incorporer dans les modèles macroéconomiques le paradigme microéconomique de l'agent capable de maximiser son utilité intertemporelle en disposant de toute l'information pertinente à ce calcul. Les modèles dynamiques stochastiques d'équilibre général (DSGE) en sont les produits les plus aboutis, auxquels les banques centrales ont largement recours. La publication séminale remonte à Obstfeld & Rogoff (1995), l'ouvrage de Woodford (2003b) constitue quant à lui un véritable traité de cette nouvelle macroéconomie orientée vers la politique monétaire. Les contributions de Walsh (2003b) et Gali (2008), entre autres, complètent ce travail. Cette modélisation a, en particulier, l'avantage de fournir un cadre d'analyse cohérent et auto-suffisant, capable de donner des implications de politique économique claires et de reproduire des faits observés (De Grauwe (2011)). Ces modèles reposent plus généralement sur le paradigme néoclassique dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

1. Les agents sont supposés dotés de *rationalité substantive*, qui leur permet de connaître et de traiter toutes les données pertinentes à la réalisation de leur objectif. En particulier, ils sont capables de former des *anticipations rationnelles*, c'est-à-dire que les probabilités qu'ils attribuent aux différents événements futurs coïncident avec la vraie loi de probabilité qui les gouverne.
2. Les échanges sur les marchés sont passivement régulés par le mécanisme coordinateur des prix, dans l'esprit du commissaire-priseur walrasien.
3. Toutes les caractéristiques d'une population peuvent être résumées par un *agent représentatif*, de sorte que les comportements agrégés résultent de l'agrégation ou de la moyenne des comportements individuels. Ce point découle du réductionnisme, qui postule qu'un système complexe

n'est autre que la somme de ses composants (voir Kirman (1992) pour une discussion critique de cette hypothèse).

4. L'analyse est centrée sur un état d'*équilibre* de référence du modèle, état dans lequel tous les marchés sont apurés, les dotations des agents sont *identiques* (équilibre symétrique), et l'allocation obtenue est Pareto-efficace, dans le sens où elle maximise un critère de bien-être social.

Il résulte de ces hypothèses que certaines dimensions des phénomènes économiques ne peuvent être prises en compte par ces modèles. En effet, les problèmes de *coordination* sur les marchés sont évacués par hypothèse ; l'absence d'*hétérogénéité* entre les agents interdit toute *interaction* entre eux ; l'hypothèse d'anticipations rationnelles ne laisse aucune place à des processus d'*apprentissage*, si ce n'est par l'augmentation de l'ensemble d'informations des agents. En effet, ces modèles supposent des capacités cognitives extrêmement sophistiquées des agents : "*they are assumed to be capable of understanding the whole picture*" (De Grauwe (2011)). De plus, l'équilibre général est obtenu par résolution simultanée de l'équilibre sur tous les marchés et ne laisse donc pas la place à une vision séquentielle du processus de décisions économiques. Même si certains travaux retiennent des formes moins strictes de ces hypothèses<sup>3</sup>, ils n'en remettent pas en cause les fondements.

Au contraire, l'économie à base d'agents considère l'économie comme un système adaptatif au sens de la définition ci-dessus<sup>4</sup> :

*Decentralized market economies are complex adaptive systems. Large numbers of micro agents engage repeatedly in local interactions, giving rise to macro regularities such as employment and growth rates, income distributions, market institutions, and social conventions. These macro regularities in turn feed back into the determination of local interactions. The result is an intricate system of interdependent feedback loops connecting micro behaviors, interaction patterns, and global regularities.* (Tesfatsion (2006b, p.191))

3. Voir notamment la vaste littérature liant l'apprentissage et les modèles macroéconomiques, recensée dans Evans & Honkapohja (2001) ou à la section IV du chapitre 1.

4. Il faut en fait distinguer entre les modèles à base d'agents, qui sont des outils qui permettent de représenter l'économie selon le paradigme des systèmes complexes adaptatifs et le cadre théorique de l'économie dite *évolutionniste* qui considère l'économie comme un système complexe adaptatif (voir Oeffner (2008, pp. 16-18) pour une discussion précise de ce point). Le terme "évolutionniste" remonte à la contribution de Nelson & Winter (1982), par analogie à la théorie de l'évolution en biologie. Deux opérateurs sont cruciaux : la diversité et la sélection. La simple interaction de ces deux éléments, pourvu qu'elle ait lieu un grand nombre de fois, peut produire des résultats très sophistiqués. Le monde est peuplé d'éléments qui adaptent ainsi leurs attributs à la situation qu'ils créent ensemble, l'environnement n'est pas exogène (Arthur (2006)). Yıldızoğlu (n.d.) fournit un exposé complet et accessible de l'approche évolutionniste de la dynamique macroéconomique, illustré à partir d'analyses, notamment de la dynamique industrielle, domaine de développement initial de cette approche. Dans la suite, pour simplifier, nous utilisons le terme générique "économie à base d'agents" pour parler de cette approche au sens large.

L'économie est alors un monde peuplé d'unités hétérogènes et autonomes, qui interagissent entre elles, chacune d'entre elles cherchant l'accomplissement d'un objectif propre. Ces unités sont appelées des *agents*, c'est-à-dire des objets, auxquels le modélisateur attribue des données et des règles de comportement à partir de ces données : type, caractéristiques structurelles, règles publiques communes à tous les agents, règles privées spécifiques à chaque agent, ... Ainsi, dans le modèle que nous développons, un des agents est de type "firme", caractérisé par une fonction de production, une stratégie de demande de travail, un comportement de fixation du prix et une règle de révision de sa stratégie qui vise à augmenter son profit. La firme interagit avec les autres agents, ici des ménages, sur le marché du travail et le marché du bien dans le cadre des règles de rationnement postulées sur ces marchés.

Dans cette optique, cinq propriétés sont fondamentales (Arthur et al. (1997)) :

1. *Une interaction dispersée* : les conséquences des décisions d'un agent dépendent des actions des autres et de l'état de l'environnement à une période donnée. Par exemple, dans le modèle que nous présentons, sur le marché du travail, les ménages sont confrontés à la firme par ordre croissant de salaire nominal désiré, de sorte que les moins exigeants sont d'abord embauchés. Si un ménage choisit d'augmenter son salaire nominal désiré d'un taux supérieur à celui de l'inflation qu'il anticipe, il ne verra pas systématiquement son salaire réel augmenter. Ce sera le cas si la demande de travail de la firme est suffisante pour absorber l'offre : tous les ménages sont alors embauchés, chacun au salaire désiré. Dans le cas où la demande de travail est inférieure à l'offre, le ménage augmente son salaire réel uniquement si les autres agents sont encore plus exigeants que lui, de sorte qu'il soit confronté à la firme avant eux et puisse être embauché.
2. *L'absence de coordonnateur global* : le commissaire-priseur walrasien, notamment, n'existe pas. Dans notre modèle, l'offre et la demande sur chaque marché obéissent à des mécanismes d'appariement particulier, pouvant déboucher sur du rationnement.
3. *Une adaptation continue* : l'expérience des agents et les états de l'environnement modifient en permanence leurs croyances et leurs comportements. Ainsi, l'apprentissage social dans lequel sont engagés les agents de notre modèle leur permet d'imiter des stratégies d'autres agents qui se sont révélées plus performantes que les leurs.
4. *L'apparition perpétuelle de la diversité* : dans notre modèle, le processus d'expérimentation individuelle auquel chaque agent peut se livrer permet d'introduire sans cesse de nouvelles stratégies dans la population de stratégies existantes.
5. *Une dynamique de déséquilibre* : l'économie peut opérer loin de tout équilibre walrasien, et en particulier loin de l'équilibre optimal<sup>5</sup>. Par exemple, notre modèle inclut la possibilité qu'il y

---

5. Cette caractéristique, et en particulier les mécanismes de rationnement qui en découlent, peuvent être

ait du chômage dans le système économique, l'économie se trouvant alors hors de son sentier de production potentielle.

La combinaison de ces cinq éléments aboutit à un modèle complexe, pour lequel l'obtention de solutions analytiques n'est plus garantie. La résolution du modèle, i.e. la détermination des dynamiques agrégées, n'est souvent possible que par simulation numérique : "*Agent-based modeling is about how patterns in the economy form and usually, such formation is too complicated to be handled analytically – hence the resort to computer simulation*". (Arthur (2006, p. 1553)). Ceci nous permet en particulier de nous détacher de la contrainte de tractabilité des modèles analytiques.

Nous exposons maintenant les raisons qui nous poussent à avoir recours à ce type de modélisation pour l'analyse des régimes de ciblage de l'inflation.

## I.2 Pourquoi une économie à base d'agents pour modéliser un régime de ciblage de l'inflation ?

Les éléments centraux qui justifient l'existence d'une politique de transparence des banques centrales, et des régimes de ciblage de l'inflation en particulier peuvent être résumés ainsi : i) les agents ne sont pas dotés de rationalité substantive qui leur permettrait de former des anticipations rationnelles mais sont, au contraire, engagés dans un processus perpétuel d'apprentissage de leur environnement (King (2005), Orphanides & Williams (2007)) ; ii) les agents ne connaissent pas toute l'information pertinente, notamment le vrai modèle de l'économie, et ont besoin de l'information communiquée par la banque centrale pour former leurs anticipations (Svensson (2009)) ; iii) les agents n'ont pas accès aux mêmes informations ou ne sont pas dotés de la même capacité à les traiter et, en conséquence, ils ne forment pas nécessairement les mêmes anticipations et leurs actions ainsi que leurs attributs peuvent diverger (Delli Gatti et al. (2010)). Ainsi, les anticipations peuvent ne pas correspondre aux objectifs de la banque centrale, les individus peuvent prendre des décisions qui ne sont pas en adéquation avec celles des autres. Il en résulte des problèmes de coordination entre les agents d'une part, qui peuvent empêcher les marchés de s'apurer, et entre la banque centrale et les agents d'autre part, qui ne permettent pas *a priori* aux anticipations de s'ancrer sur les objectifs des autorités monétaires : l'économie peut être en déséquilibre.

---

rapprochés de la théorie du déséquilibre telle qu'elle a été synthétisée dans Benassy (1993). Cependant, cette théorie généralise le concept d'équilibre walrasien aux marchés qui ne s'apurent pas, en intégrant dans le programme d'optimisation des agents le rationnement potentiel comme une contrainte supplémentaire. Dans notre approche, le déséquilibre provient de l'absence d'un mécanisme implicite de coordination *ex ante* des décisions économiques des agents, et les comportements de ces derniers résultent d'ajustements et non d'un processus d'optimisation.

Les propriétés des modèles néoclassiques soulignées au paragraphe précédent – en particulier le postulat d'anticipations rationnelles et l'hypothèse d'information complète – implique un mécanisme de coordination implicite qui ignore, par construction, ces éléments. Nous abordons maintenant comment la modélisation à base d'agents permet de construire un cadre qui permet de les inclure explicitement.

### I.2.1 Dynamiques non-linéaires et déséquilibre

Les modèles macroéconomiques à base d'agents sont dotés de microfondations, tout comme les modèles analytiques. Cependant, le comportement agrégé du modèle n'est pas obtenu par une approche *top-down*, c'est-à-dire en imposant des contraintes sur les comportements micro, telles que la condition d'apurement des marchés ou les conditions de transversalité. Les régularités macro, telles que le taux de chômage ou le niveau d'endettement global des ménages émergent de l'interaction des agents micro selon une approche *bottom-up* (Page (2004)). La représentation d'un système complexe et adaptatif est permise par les outils informatiques de plus en plus puissants dont nous disposons aujourd'hui. Concrètement, le chercheur écrit un code informatique qui programme une économie artificielle. Une fois chaque agent et les conditions initiales spécifiés, le modèle doit être *dynamiquement complet*, c'est-à-dire qu'il doit évoluer seulement sur la base des interactions des agents, *sans intervention supplémentaire du modélisateur*. De ces interactions entre les agents au niveau microscopique émergent alors, de manière autonome, des comportements observables au niveau macroscopique. Même si le modélisateur spécifie les schémas de comportements des agents individuels ainsi que de leurs interactions, l'objet d'analyse est la dynamique globale du système économique (Yıldızoglu (n.d.)). Ainsi, l'objet d'étude central se déplace de l'état d'équilibre du système, ou son voisinage, dans les modèles analytiques, vers le déroulement entier de la dynamique d'évolution de l'économie. L'équilibre est un résultat potentiel, sur lequel les agents peuvent se coordonner, plutôt qu'un prérequis de la modélisation. Cette approche permet aussi de modéliser des dynamiques complexes. Dans un modèle à base d'agents, les choix d'un agent, à *un moment donné*, dépendent, au moins indirectement, des choix passés de cet agent ainsi que des choix des autres. Les états passés du modèle déterminent, au moins pour partie, le déroulement du modèle dans les périodes suivantes : on parle de dépendance au sentier. Les dynamiques qui résultent de ces interactions peuvent être non linéaires, et la modélisation à base d'agents permet de contourner la nécessité d'une méthode de linéarisation pour les traiter analytiquement.

Ainsi, la modélisation à base d'agents permet l'analyse de dynamiques économiques non-linéaires, non-centrées sur une vision d'équilibre de ces dynamiques. C'est dans ce genre de configurations, dans lesquelles l'économie opère loin de l'équilibre visé par les autorités monétaires que la communication de la banque centrale s'avère fondamentale (McCallum (1997), Blinder (1998)).

### I.2.2 Apprentissage et comportements adaptatifs

Le modélisateur dispose d'une grande latitude dans le choix des règles de comportement par rapport aux modèles analytiques puisque la condition de tractabilité du modèle n'est plus nécessaire, les résultats étant obtenus par simulation numérique. Comme le remarque Tesfatsion (2006a, p. 866), "*programming frees us to adapt the tool to the problem rather than the problem to the tool*". Les agents sont alors dotés de davantage d'*autonomie* dans le sens où leurs compétences, notamment en termes d'apprentissage sont beaucoup plus larges que celles de l'*homo economicus* traditionnel (Jennings (2000)). Ces compétences incluent par exemple la capacité d'apprendre de son environnement, de collecter des informations et des expériences passées, d'imiter d'autres agents, d'expérimenter de nouvelles stratégies, de réviser ses croyances en fonction des résultats de son apprentissage. Ainsi, le modèle que nous proposons retient un mécanisme d'apprentissage pour les ménages basé pour partie sur la reproduction sociale et pour partie sur l'innovation individuelle tout à fait en phase avec cette notion d'autonomie. Cette représentation de l'apprentissage diffère de celle utilisée dans les modèles macroéconomiques à la Evans & Honkapohja (2001), parce qu'elle lève certaines des contraintes majeures sur l'environnement économique ainsi que sur les agents nécessaires à la mise en place d'algorithmes d'apprentissage tels que les moindres carrés : existence d'une forme réduite du modèle sous-jacent de l'économie, connaissance par les agents de cette forme, dans laquelle seule la vraie valeur des paramètres est inconnue (ou au plus, les agents commettent des erreurs dans les variables à inclure dans la régression, Evans & Honkapohja (2001)), homogénéité des agents (ou, au plus, hétérogénéité matérialisée par deux classes d'agents, voir Honkapohja & Mitra (2006)).

En effet, les modèles à base d'agents sont fondamentalement caractérisés par une incertitude radicale, au sens de Knight (1921), c'est-à-dire que les événements futurs ne peuvent être décrits par une certaine distribution de probabilité d'occurrence. Dans ce contexte, les agents ne peuvent former des anticipations rationnelles et sont obligés d'adopter une forme de comportement adaptatif. De ces comportements adaptatifs émerge une *incertitude comportementale*, i.e. une incertitude concernant les actions des autres agents. Delli Gatti et al. (2010) parlent d'*incertitude endogène*, dans le sens où cette incertitude est générée par les propres actions des agents. L'économie à base d'agents permet de concevoir un individu adaptatif, doté d'une *rationalité procédurale*, au sens de Simon (1971) : les agents ne peuvent pas optimiser un objectif, dans la mesure où leurs capacités cognitives (mémoire, capacités de calcul...) et leurs informations sont limitées. Au contraire, ils cherchent à adopter des règles de décision simples, ou routines, qui leur permet d'atteindre un niveau *satisfaisant* de leur objectif, compte tenu des difficultés inhérentes au monde complexe dans lequel ils évoluent. Par exemple, dans notre modèle, la firme adopte une simple règle de révision adaptative de sa stratégie de demande de travail, dans

le but d'augmenter son profit : si la tendance du profit est croissante, la firme augmente sa demande de travail d'un taux fixé et inversement. Cette forme d'algorithme graduel, proche de l'apprentissage du gradient, modélise de manière intuitive ce concept de rationalité procédurale (Leijonhufvud (2006, pp. 1631-32)).

Ainsi, *la modélisation à base d'agents permet d'inclure aisément des processus d'apprentissage et d'adaptation divers de la part des agents.* La communication de la banque centrale fournit aux agents des informations qui sont susceptibles de les aider à adapter leurs comportements et à améliorer leurs performances.

### I.2.3 Hétérogénéité et agrégation

L'approche *bottom-up* permet de contourner les difficultés inhérentes aux modèles analytiques, relatives à l'agrégation de comportements microéconomiques, de laquelle résulte la dynamique macroéconomique. Ces difficultés proviennent de la combinaison de l'apurement des marchés et des hypothèses en matière d'hétérogénéité. Dans les modèles à base d'agents, les comportements macroéconomiques émergent des interactions locales entre les agents. Il est donc aisé de modéliser explicitement en amont des agents *hétérogènes*, aussi bien dans les attributs dont ils disposent que dans leurs règles de comportements. Dans le modèle que nous développons ci-après, nous supposons que tous les agents d'un même type agissent selon les mêmes règles. Ainsi, tous les consommateurs sont engagés dans le même processus d'apprentissage social et exploratoire individuel et ils partagent tous la même fonction d'utilité. Cependant, ils sont hétérogènes dans leurs attributs : leurs revenus, leurs stratégies, leur consommation et l'utilité qui en résulte, etc... diffèrent. Notons que l'hétérogénéité des stratégies est une condition nécessaire à la mise en oeuvre de l'apprentissage social<sup>6</sup>.

Ainsi, *la modélisation à base d'agents permet de spécifier un fort degré d'hétérogénéité des agents.* La communication de la banque centrale est susceptible de jouer un rôle coordonnateur, notamment de leurs croyances, et en retour de leurs actions.

Pour les raisons énumérées ci-dessus, le cadre de l'économie à base d'agents nous apparaît bien adapté à la représentation d'un système macroéconomique en général, et à la modélisation d'un régime de ciblage de l'inflation en particulier. Néanmoins, malgré ces attraits, cette méthode présente des limites et posent de nouveaux défis au modélisateur, notamment en termes de robustesse des résultats obtenus par ces modèles. A cet égard, nous insistons, dans la section qui suit, sur le processus de

---

6. Certes, il existe des travaux qui considèrent, dans le cadre analytique standard, des agents hétérogènes (voir par exemple Honkapohja & Mitra (2006)). Cependant, l'hétérogénéité est limitée, pour des raisons d'obtention de résultats analytiques, notamment à deux agents ou à un continuum d'agents dont les paramètres ou dotations sont distribués normalement autour de la valeur moyenne de la population.

validation d'un modèle à base d'agents, qui fournit une méthode rigoureuse pour élaborer ce type de modèle et en garantir la robustesse.

### I.3 Les résultats des modèles à base d'agents peuvent-ils être considérés comme robustes ?

Nous exposons d'abord les principaux points de discorde autour de la construction et de l'analyse de ces modèles puis présentons une méthode qui permet, dans une certaine mesure, d'y répondre. Nous adaptons alors cette méthode à notre question de recherche dans le but d'établir de manière rigoureuse notre modèle.

#### I.3.1 Interrogations autour des résultats des modèles économiques à base d'agents

Premièrement, comme nous l'avons vu, le modélisateur dispose d'une plus grande latitude dans le choix des règles de comportement assignées aux agents et, plus généralement, dans la conception du modèle. Contrepartie de cette plus grande liberté, ces modèles peuvent apparaître *ad-hoc* aux tenants des modèles analytiques, c'est-à-dire que leurs hypothèses ne sont pas nécessairement fondées sur des formalisations théoriques usuelles, telles que la maximisation sous contraintes d'une fonction aux propriétés habituelles. La structure du modèle est d'autant plus difficile à justifier qu'il est difficile de confronter les résultats des modèles à base d'agents aux données empiriques. En effet, ces modèles simulent différents *scenarii* possibles en fonction des hypothèses et configurations initiales. Il produisent ainsi un spectre de dynamiques et cet ensemble de résultats colle difficilement aux données empiriques, qui sont, par nature, une réalisation unique d'un processus générateur de données méconnu (Tesfatsion (2006a)).

Cependant, le contre-argumentaire de De Grauwe (2011) est intéressant à cet égard : "In defense of this "*ad-hocquerie*", the following should be stressed. Once we leave the comfortable world of agents who experience no limits to their cognitive abilities, *ad-hoc* assumptions are inevitable. This is due to the fact that we do not fully comprehend the way individuals with cognitive limitations process information. In contrast, there is not secret in how the superbly informed individuals in the rational expectations top down world process information. [...] In addition, the current DSGE-models have attached many *ad-hoc* features aimed at improving the empirical fit which they fail to produce without these additions.. L'introduction d'éléments *ad-hoc* est ainsi incontournable. Néanmoins, nous tentons de dévouer un grand soin à la justification des hypothèses que nous retenons dans notre modèle.

Deuxièmement, comme mentionné plus haut, un modèle à base d'agents doit être dynamiquement

complet. Sa construction requiert alors la spécification complète et détaillée des données des agents, de leurs règles de comportement et d'interaction ainsi que des conditions initiales (valeurs des paramètres structurels du modèle, des dotations et stratégies initiales des agents...). Si les interactions induisent de forts effets en retour sur le comportement du modèle, les résultats peuvent être très sensibles à des changements relativement mineurs dans la spécification initiale (Tesfatsion (2006a)). Pour que les résultats obtenus soient suffisamment *robustes*, il est souvent nécessaire de mener des expérimentations intensives sur de larges configurations des spécifications possibles. Outre l'ampleur de la tâche et le temps requis, exploiter les données générées par un modèle à base d'agents soulève des questions méthodologiques (voir Judd (2006)).

En effet, la complexité d'un tel modèle interdit souvent l'utilisation des outils traditionnels de l'analyse économique : définitions et hypothèses dont découlent des théorèmes prouvés analytiquement, statique comparative, résolution sous forme réduite... Les méthodes computationnelles simulent des scenarii possibles, en fonction des conditions initialement spécifiées. On peut alors mettre en doute le caractère représentatif des résultats obtenus dans la mesure où ces scenarii ne constituent que des exemples, par opposition aux modèles analytiques capables de fournir des théorèmes. Ce problème est accentué lorsque le modèle est non-déterministe, et qu'une même configuration initiale produit des trajectoires différentes chaque fois qu'elle est répétée. C'est le cas de notre modèle, dans la mesure où les tirages aléatoires lors de l'initialisation ainsi que du processus d'apprentissage y introduisent des éléments stochastiques.

Cependant, comme le souligne Judd (2006, p. 886), "*theories usually examine a continuum of examples, but [...] assumptions made for reasons of tractability may miss many interesting phenomena [...]. While computations examine only a finite set of examples, that set can be taken from a much more robust set of possible specifications, allowing more flexible functional form specifications as well as more complex and realistic assumptions about the distribution of information and evolution of beliefs. The relevance and the robustness of examples is more important than the number of examples and computational methods allow one to examine cases that theory cannot touch*". Judd (2006) fournit ainsi un guide des différentes techniques computationnelles permettant d'examiner de manière systématique les dynamiques de ces modèles et d'en tirer des propositions fondées. Il existe donc des réponses computationnelles aux interrogations que suscitent les modèles à base d'agents et la robustesse de leurs résultats.

Néanmoins, ces méthodes computationnelles posent aussi des problèmes en termes de communication des résultats. Alors que les théorèmes fournis par les modèles analytiques constituent une énonciation claire et concise d'un résultat, il est beaucoup moins aisé de résumer l'information appor-

tée par un grand nombre d'exemples de manière intelligible (Judd (2006)). A cet égard, l'annexe II de ce chapitre expose les outils d'analyse auxquels nous avons recours pour exposer les résultats de notre modèle. Nous espérons ainsi faciliter l'accessibilité et la critique de notre travail à des lecteurs qui ne sont pas nécessairement familiers de cette méthode et de ces outils. En effet, nous adoptons le point de vue de Judd (2006, pp. 891-92) : "*The ultimate goal is for computational and theoretical tools to interact in a fruitful manner. [...] The hope here is that a clear understanding of alternative methodologies will foster vigorous interactions where each approach benefits from the insights of the other*".

Après ce tour d'horizon des critiques auxquelles s'expose la modélisation à base d'agents, notamment vis-à-vis des modèles analytiques, nous devons garder à l'esprit qu'il convient d'être prudent quant à l'usage qui est fait des résultats de ce type de modèles : "*because of the inherent complexity of the problem, even the new advanced analytic and ACE macro models should be seen as stepping stones on the path to a deeper model of macro sometime in the future. However, they 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 et al. (2008, p. 240)). Ce point de vue est également défendu par Ashraf & Howitt (2012) ou Levine (2011). A cet égard, nous concluons cette section par une vue d'ensemble du processus de validation d'un modèle à base d'agents, processus qui nous permet de déterminer un niveau de confiance dans les résultats obtenus avec notre modèle.

### I.3.2 Comment garantir la robustesse d'un modèle à base d'agents ?

Cette section s'appuie sur des travaux issus des sciences de l'ingénieur et de l'informatique. A notre connaissance, la seule application à un modèle économique de cette méthode se trouve dans la thèse de doctorat de Oeffner (2008), dont nous nous sommes inspirés pour appliquer cette démarche à l'obtention de notre modèle.

Nous suivons les trois étapes décrites par Klügl (2008) et représentées par la figure 2.1.

i) Le modèle Nouveau Keynésien constitue notre socle de départ, dans la mesure où c'est aujourd'hui le cadre d'analyse standard des questions macroéconomiques (Woodford (2003b)). Après en avoir développé une compréhension poussée, nous intégrons sa *structure* dans un modèle à base d'agents, dont les *caractéristiques* nous permettent d'en dépasser les *hypothèses* et d'intégrer les ingrédients qui nous intéressent : processus d'apprentissage, hétérogénéité des agents, incertitude radicale. A cette fin de parallèle, le modèle Nouveau Keynésien est dérivé entièrement et son fonctionnement est discuté à la section II. Nous obtenons ainsi un *modèle conceptuel*, i.e. un ensemble d'hypothèses et de com-

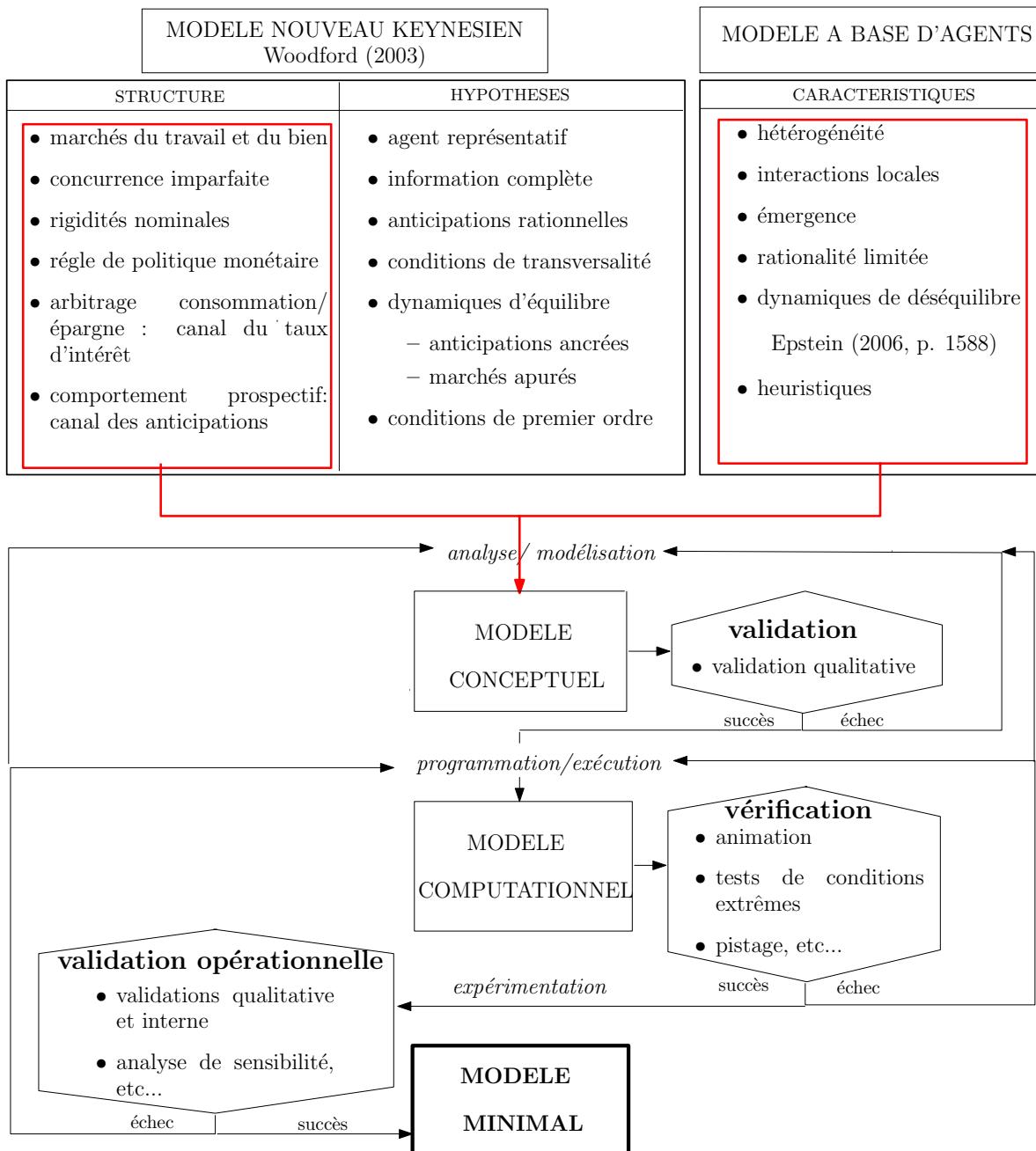


FIGURE 2.1 – Processus de construction du modèle à base d'agents pour l'analyse de politiques monétaires (inspiré de Klügl (2008))

portements, décrit par des expressions mathématiques et littéraires qui exposent le contenu du modèle. C'est l'objet de la section III de ce chapitre.

ii) Nous transcrivons ensuite le modèle en langage informatique et obtenons un *modèle computationnel*, i.e. un code informatique implémentant le modèle. Pour ce faire, nous utilisons le logiciel NetLogo<sup>7</sup>. Le pseudo-code du modèle est donné en annexe I.

7. Il s'agit d'un logiciel développé par Wilenski (1999). Cet environnement est particulièrement bien adapté

iii) A l'issue de plusieurs phases d'analyse, détaillées ci-après, nous obtenons un modèle *minimal*, à partir duquel interroger notre question de recherche.

Comme indiqué par la figure 2.1, tout au long de ces étapes, le modélisateur doit exécuter deux tâches avant de pouvoir exploiter les résultats de son modèle : la *vérification* et la *validation*. La vérification consiste à s'assurer que l'on a correctement transcrit en langage informatique le modèle conceptuel, autrement dit qu'il n'y a pas d'erreur de programmation (*building the model right*). La validation, quant à elle, consiste à s'assurer que le modèle est suffisamment exact pour l'étude du phénomène pour lequel il a été construit (*building the right model*). La première des choses à noter est qu'il n'existe pas de validité *absolute*, le modèle obtenu est validé uniquement pour répondre à la question de recherche pour laquelle il a été construit et ne prétend pas fournir des réponses pertinentes pour n'importe quelle question qu'on pourrait lui poser. En effet, un modèle nécessite toujours des abstractions et des simplifications et ne peut être à l'exacte image du phénomène que l'on tente de reproduire (Klügl (2008)). Ainsi, on peut dire que la validation désigne "*a process of increasing confidence in a model, and not one of demonstrating absolute accuracy*" (Robinson (1997, p. 53)). La seconde chose à garder à l'esprit est que la validation du modèle est primordiale. Si le modèle n'est pas considéré comme validé, les réponses dérivées de ses simulations ne peuvent pas être considérées comme des réponses *crédibles* à notre question de recherche. Pour cette raison, nous dévouons une partie conséquente du chapitre suivant de la thèse à cette tâche, avant d'entrer dans le coeur de l'analyse de notre question de recherche. L'encadré 2.1 expose les principales techniques que nous y utilisons et l'annexe II de ce chapitre explique les outils retenus.

Tout d'abord, comme explicité par la figure 2.1, nous devons procéder à la *validation* lors de l'élaboration du modèle conceptuel, durant laquelle nous nous assurons que les hypothèses et théories retenues sont raisonnables et que le modèle contient tous les détails nécessaires pour atteindre l'objectif de la modélisation. Nous devons ensuite procéder à la *vérification* du modèle computationnel, c'est-à-dire s'assurer que le code informatique retranscrit correctement le modèle conceptuel. Pour ce faire, le modélisateur "joue" avec le modèle, notamment en le regardant tourner sur l'interface avec différentes configurations de paramètres. Parfois, l'exécution du modèle révèle des manques dans le modèle conceptuel. Par exemple, dans notre modèle, les premières phases de vérification ont montré des dynamiques de surendettement des ménages. Il a donc été nécessaire d'introduire des contraintes sur la dette des consommateurs (voir encadré 2.3, page 95). Ainsi, au fur et à mesure du travail, de

---

pour modéliser les systèmes complexes et explorer les connexions micro/macro. Il a en plus l'avantage d'avoir une grande communauté d'utilisateurs, de présenter une interface conviviale et de permettre une utilisation plutôt intuitive.

**Encadré 2.1 – Principales techniques de vérification et de validation utilisées dans la thèse (voir R. Sargent (2010) pour une revue détaillée)**

Les techniques énumérées ci-dessous ne se veulent pas mutuellement exclusives et peuvent être, au contraire, utilisées ensemble. La figure 2.1 explicite à quel moment du cycle de construction de modèle nous avons davantage recours à l'une ou à l'autre. Cependant, toutes ces techniques peuvent être mobilisées à chaque étape, en fonction des caractéristiques du problème pour lequel le modèle est développé.

- *Animation* : en lançant le modèle, le modélisateur examine son comportement sur les graphiques de l'interface du logiciel (par exemple, les courbes de la production et du taux de chômage).
  - *Tests de conditions extrêmes* : le modélisateur s'assure que les résultats du modèle sont cohérents lorsque les paramètres sont fixés à des valeurs extrêmes (par exemple, que la production est effectivement nulle si l'offre de travail est fixée à zéro).
  - *Validation qualitative<sup>a</sup>* : le modélisateur s'assure que les processus et les résultats sont plausibles par rapport à la théorie et sa connaissance propre du phénomène modélisé.
  - *Validation interne* : dans le cas de modèles non-déterministes, plusieurs réplications d'une même configuration du modèle sont lancées. En cas de forte variabilité entre les différentes réplications, les résultats du modèle peuvent être remis en cause.
  - *Représentations graphiques* : les résultats des simulations sont représentées graphiquement (boîtes à moustaches, arbres de régression, histogrammes...). Ceci a l'avantage d'être applicable sans supposer a priori que les données présentent des propriétés particulières (indépendance, normalité...).
  - *Analyse de sensibilité* : les valeurs des paramètres sont modifiées systématiquement dans le but de voir leur impact sur les résultats du modèle. Les paramètres non-influents ne font pas l'objet d'analyse supplémentaire.
  - *Pistage* : le modélisateur se focalise sur le comportement de différents agents, au niveau microscopique, et détermine si les comportements sont logiques (par exemple, il s'assure qu'un individu surendetté ne peut accéder au marché du bien à la période suivante).
- a. Le terme anglophone est *face validation*. Nous proposons de traduire ce terme par "validation qualitative" puisqu'à notre connaissance, aucune littérature francophone n'aborde cette notion.

l'amélioration de la compréhension du phénomène à l'étude et des difficultés rencontrées, des modifications en amont du processus de construction du modèle peuvent être exigées et le modèle conceptuel et ses hypothèses sont ainsi modifiés. Il doit donc être validé de nouveau et le modèle computationnel en découlant doit être vérifié à nouveau également (Robinson (1997)). Cette phase de vérification du modèle computationnel est très importante dans la mesure où elle permet d'appréhender le comportement global du modèle, de former des intuitions quant aux relations entre ses différentes composantes, de repérer des configurations qui produisent des résultats inattendus ou suscitent un intérêt particulier pour notre question de recherche... Ce sont autant d'éléments qui se révèlent d'une grande utilité dans les phases de validation subséquentes du modèle.

Une fois le modèle computationnel vérifié, nous procédons à la *validation opérationnelle*, qui s'as-

sure que les résultats du modèle sont suffisamment pertinents pour répondre à la question de recherche posée. Le modélisateur explore alors, en détails, le comportement du modèle, aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif : évaluation de l'ordre de grandeur des variables, inspection des relations entre les variables et les paramètres, etc... Parmi les outils mobilisés, l'analyse de sensibilité est fondamentale. Elle permet ainsi au modélisateur i) d'améliorer sa compréhension du comportement du modèle, à partir de ses intuitions, en révélant notamment comment les différents comportements dépendent les uns des autres et de la valeur des paramètres ; ii) d'identifier les valeurs dangereuses de paramètres, qui mènent à un comportement chaotique du modèle et symétriquement d'identifier leurs valeurs admissibles et iii) d'exclure des analyses futures les paramètres qui ne jouent pas sur la dynamique du modèle (Klügl (2008)). Nous verrons, au chapitre suivant, l'intérêt de cette démarche. On obtient alors un modèle *minimal*, impliquant un jeu minimal de paramètres. Il faut veiller, cependant, à ne pas simplifier à l'extrême le modèle. Par ailleurs, nous avons recours à un plan d'expériences pour échantillonner l'espace des paramètres couplé à une technique de métamodélisation pour l'analyse de sensibilité (voir l'annexe II de ce chapitre pour plus de détails). C'est une pratique très répandue dans l'analyse des modèles de simulation, en raison du souvent grand nombre de paramètres impliqués (Klügl (2008)). Notons que, comme le souligne R. Sargent (2010), la validation est un processus pour lequel il n'existe pas d'algorithme ou de prescription clair et universel. C'est au modélisateur de déterminer à quel moment le modèle produit des résultats qu'il juge *suffisamment* cohérents. Cette décision doit aussi être considérée par rapport aux objectifs attribués au modèle.

Pour finir, Klügl (2008) propose de distinguer deux dimensions du processus de validation opérationnelle : la validation qualitative (*face validation*) et la validation empirique. Nous ne retenons que la première, comme explicité ci-dessus dans la mesure où nous visons l'obtention d'un modèle théorique qui nous permette de revisiter les résultats obtenus dans la littérature traditionnelle grâce à des modèles analytiques théoriques. La validation empirique suppose, quant à elle, un système de référence (des données macroéconomiques par exemple), vis-à-vis duquel comparer les résultats du modèle. Elle aboutit à une configuration du modèle dont les résultats sont proches (au sens statistique) de la dynamique des données empiriques utilisées (on parle de calibration du modèle). Une telle démarche peut être en revanche envisagée dans une prochaine étape du travail de recherche.

Nous avons présenté un exposé des principes généraux de l'économie à base d'agents, par opposition à ceux des modèles analytiques usuels ainsi qu'un regard critique sur cette modélisation. En conséquence, nous partageons le point de vue de Tesfatsion (2006a, p. 864) : "*ACE modeling is surely a complement, not a substitute, for analytical and statistical modeling approaches*". Au vu du nombre de contributions relatives aux régimes de ciblage de l'inflation dans le cadre usuel des modèles ana-

lytiques, nous choisissons un modèle à base d'agents car nous pensons justement, pour les raisons évoquées ci-dessus, que ce type de modélisation peut apporter un regard complémentaire et enrichissant sur les propriétés de ces régimes. La section qui suit expose le socle de départ de la construction de ce modèle : le modèle Nouveau Keynésien (NK).

## II Le socle de départ : le modèle Nouveau Keynésien de base

Le cadre d'analyse NK est devenu dans la dernière décennie le cadre théorique privilégié des questions relatives à la politique monétaire (Clarida et al. (1999)). Il repose sur l'utilisation de modèles dits dynamiques stochastiques d'équilibre général (DSGE). Il s'agit de modèles d'optimisation microfondés, dans lesquels la dynamique macroéconomique est dérivée de l'agrégation de comportements d'agents microéconomiques résultant d'un programme d'optimisation représentatif dans un contexte de marchés en équilibre. Ces modèles intègrent des éléments Keynésiens, en particulier un environnement de prix partiellement rigides dans un appareil d'équilibre général dynamique inspiré des modèles de cycles réels (Gali (2001)). Les publications de Yun (1996), King & Wolman (1996) et Woodford (1996) donnent les fondements de ces modèles. Les ouvrages de Woodford (2003*b*), Walsh (2003*b*) et Gali (2008) permettent d'en donner une présentation complète. En nous appuyant fortement sur ces monographies, nous reprenons la dérivation complète du modèle NK de base, c'est-à-dire la version la plus épurée de ce type de modèle (voir Woodford (2003*b*, chap. 4)). Nous faisons abstraction des dépenses budgétaires et retenons des formes particulières de la fonction d'utilité des ménages et de la fonction de production des firmes (voir Gali (2008)). Ces simplifications n'entravent en rien la compréhension de la logique globale du modèle et des hypothèses nécessaires à sa cohérence, ce qui constitue l'objet de cet exposé. Cette section remplit deux objectifs : d'une part, mettre en lumière le fonctionnement de ce type de modèles et l'importance des hypothèses d'information et de rationalité qui y sont nécessaires, comme il a été discuté ci-dessus et d'autre part, permettre le parallèle entre la présentation de notre modèle qui conclut ce chapitre et celle des modèles analytiques traditionnellement utilisés en macroéconomie.

## II.1 Comportement des ménages

Le modèle NK décrit une économie fermée, dans laquelle un *agent représentatif*<sup>8</sup>, supposé "immortel" maximise son utilité intertemporelle via la fonction objectif :

$$E_t \sum_{k=0}^{\infty} \beta^k u(C_{t+k}, H_{t+k}), \quad (2.1)$$

Woodford (2003b) considère une économie sans friction monétaire (*cashless*). La monnaie sert alors d'unité de compte et non de moyen de transaction, ce qui explique l'absence des encaisses réelles dans la fonction d'utilité  $u$ .  $0 < \beta < 1$  représente le taux d'escompte du ménage, qui traduit son degré de préférence pour le présent.  $E_t(\cdot) = E(\cdot | I_t)$  représente l'opérateur d'anticipations rationnelles, défini comme l'espérance mathématique de la variable conditionnellement à l'information disponible en  $t$ ,  $I_t$ . Nous retenons la fonction d'utilité donnée par Gali (2008) :

$$u(C_t, H_t) = \frac{C_t^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \frac{H_t^{1+\phi}}{1+\phi}, \quad (2.2)$$

En particulier,  $u$  est croissante en  $C$ , la consommation totale réelle du ménage, décroissante en  $H$ , le nombre d'heures de travail fournies par le ménage, strictement concave en ces deux arguments et continûment différentiable.  $\sigma \geq 0$  désigne l'inverse de l'élasticité intertemporelle de substitution de la consommation (si  $\sigma = 1$ ,  $u(C_t) \equiv \ln(C_t)$ ) et  $\phi \geq 0$  l'élasticité de l'offre de travail.

On définit  $C_t$  par l'index de la consommation de Dixit & Stiglitz (1977)

$$C_t \equiv \left( \int_0^1 c_t(j)^{1-\frac{1}{\varepsilon}} dj \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}. \quad (2.3)$$

qui permet d'agréger la consommation d'un continuum de biens différenciés indexés par  $j \in [0, 1]$ , avec  $c_t(j)$  la consommation du bien  $j$  en  $t$  tel que  $\varepsilon > 1$  définisse l'élasticité de substitution constante entre les différents biens. L'indice de prix associé à (2.3) est donné par :

$$P_t \equiv \left( \int_0^1 p_t(j)^{1-\varepsilon} dj \right)^{\frac{1}{1-\varepsilon}}. \quad (2.4)$$

avec  $p_t(j)$  le prix du bien  $j$ . Le ménage maximise donc (2.1) sous contrainte de budget donnée par :

$$\int_0^1 p_t(j)c_t(j) dj + B_t \leq B_{t-1}(1 + i_{t-1}) + W_t H_t + \Pi_t, \quad t = 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

---

8. Pour cette raison et pour alléger la notation, nous omettons l'indice  $i$  désignant un ménage particulier.

avec  $W_t$  le salaire horaire nominal et  $\Pi_t$  les profits qu'il reçoit des firmes, chaque ménage étant supposé détenir une part égale des firmes. On suppose qu'il n'y a qu'un seul type de titre dans l'économie – une obligation publique sans risque à maturité une période (Woodford (2003b, p. 76) – et  $B_{t-1}$  est alors la quantité d'obligations acquises en  $t-1$  et qui arrivent à maturité en  $t$ ,  $i_t$  étant le taux d'intérêt nominal sans risque associé.

Dans un premier temps, à chaque période  $t$ , le ménage répartit sa consommation entre les biens différenciés de sorte à maximiser sa consommation totale  $C_t$  pour un niveau donné de dépenses  $Z_t \equiv \int_0^1 p_t(j)c_t(j) dj$ . On peut résoudre ce problème de maximisation à l'aide du Lagrangien (voir par exemple Gali (2008, p. 61)) :

$$\mathcal{L} = \left( \int_0^1 c_t(j)^{1-\frac{1}{\varepsilon}} dj \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} - \lambda \left( \int_0^1 p_t(j)c_t(j) dj - Z_t \right) \quad (2.6)$$

On obtient pour tout  $j \in [0, 1]$  la condition de premier ordre :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial c_t(j)} = \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon} \right) c_t(j)^{-\frac{1}{\varepsilon}} \times \left( \int_0^1 c_t(j)^{1-\frac{1}{\varepsilon}} dj \right)^{\frac{1}{\varepsilon-1}} \times \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} \right) - \lambda p_t(j) = 0 \quad (2.7)$$

ce qui donne

$$\begin{aligned} c_t(j)^{-\frac{1}{\varepsilon}} C_t^{\frac{1}{\varepsilon}} &= \lambda p_t(j) \\ \Leftrightarrow c_t(j) &= \lambda^{-\varepsilon} p_t(j)^{-\varepsilon} C_t. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Par insertion de (2.8) dans l'index de consommation (2.3) et en utilisant la définition de l'indice des prix  $P_t$ , on obtient

$$\begin{aligned} C_t &= \left( \int_0^1 (\lambda^{-\varepsilon} P_t(j)^{-\varepsilon} C_t)^{1-\frac{1}{\varepsilon}} dj \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \\ &= C_t \lambda^{-\varepsilon} \left( \int_0^1 P_t(j)^{1-\varepsilon} dj \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}} \\ &= C_t \lambda^{-\varepsilon} P_t^{-\varepsilon}, \end{aligned} \quad (2.9)$$

ce qui prouve que

$$\lambda = \frac{1}{P_t}. \quad (2.10)$$

L'insertion de (2.10) dans (2.8) donne la part de  $c_t(j)$  dans la consommation agrégée  $C_t$  pour tout bien  $j$ , autrement dit la demande pour le bien  $j$  :

$$c_t(j) = \left( \frac{p_t(j)}{P_t} \right)^{-\varepsilon} C_t. \quad (2.11)$$

On obtient alors pour  $Z_t$  :

$$\begin{aligned}
 Z_t &\equiv \int_0^1 p_t(j) c_t(j) dj = \int_0^1 p_t(j) \times \left( \frac{p_t(j)}{P_t} \right)^{-\varepsilon} C_t dj \\
 &= \frac{c_t}{P_t^{-\varepsilon}} \int_0^1 p_t(j)^{1-\varepsilon} dj \\
 &= C_t P_t^\varepsilon P_t^{1-\varepsilon} \\
 &= C_t P_t
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

La matrice hessienne associée à ce lagrangien est définie négative car on peut aisément montrer que  $\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial c_t^2(j)} < 0, \forall j$  et  $\frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial c_t(j) \partial c_t(k)} = 0, \forall j \neq k$ . La solution trouvée est donc bien un maximum.

L'égalité (2.12) permet de réécrire la contrainte budgétaire (2.5) en termes de consommation globale  $C_t$  :

$$P_t C_t + B_t \leq B_{t-1}(1 + i_{t-1}) + W_t H_t + \Pi_t, \quad t = 1, 2, \dots \tag{2.13}$$

Dans un second temps, le ménage maximise (2.1) sous la contrainte de la séquence des contraintes budgétaires en termes de flux donnée par (2.13). Les deux variables de contrôle sont  $H$  et  $C$ , i.e. les deux variables de la fonction d'utilité (2.1). En effet, le choix de la consommation  $C$  détermine celui de l'épargne ou de l'endettement puisqu'il n'y a qu'un seul actif  $B$  qui permette de transférer de la richesse d'une période à l'autre. Le programme de maximisation s'écrit alors :

$$\max_{C_t, H_t} E_t \sum_{k=0}^{\infty} \beta^k \left( \frac{C_{t+k}^{1-\sigma}}{1-\sigma} - \frac{H_{t+k}^{1+\phi}}{1+\phi} \right) \tag{2.14}$$

sous la contrainte valable pour tout  $k > 0$  :

$$E_t(P_{t+k} C_{t+k} + B_{t+k}) \leq E_t((B_{t+k-1}(1 + i_{t+k-1}) + W_{t+k} H_{t+k} + \Pi_{t+k})) \tag{2.15}$$

**Conditions sur les détentions nominales des ménages** Les propriétés de la fonction d'utilité des ménages assurent l'existence d'une solution à ce programme de maximisation. En revanche, la contrainte intertemporelle (2.15) ne suppose pas *a priori* un ensemble borné. Pour le garantir, et par là l'existence d'une solution, Woodford (2003b, pp. 67-68) ajoute les trois contraintes suivantes :

$$i_t \geq 0, \quad \forall t \tag{2.16}$$

$$B_{t+1} = (1 + i_t) B_t \geq - \sum_{T=t+1}^{\infty} E_{t+1} \left( \prod_{l=t+1}^{T-1} (1 + i_l) (W_T H_T + \Pi_T) \right), \quad \forall t \tag{2.17}$$

$$\sum_{T=t}^{\infty} E_t \left( \prod_{l=t}^{T-1} (1+i_l)(W_T H_T + \Pi_T) \right) < \infty, \quad \forall t \quad (2.18)$$

Ces trois contraintes sont des *contraintes de solvabilité*. En effet, la contrainte (2.17) impose que les capacités d'endettement soient limitées par les capacités de remboursement. Le ménage peut, certes, transférer une richesse négative à la fin de la période  $t$  à la période  $t+1$ , mais l'endettement ne peut pas être supérieur à l'espérance conditionnelle de la valeur actualisée en  $t+1$  de la somme de ses revenus nominaux futurs. Cette hypothèse est naturelle dans un monde *d'information complète et parfaite* car dans le cas contraire, aucun créancier ne prêterait au ménage. Ainsi, le ménage ne peut financer une consommation infinie à l'aide d'un système à la Ponzi (i.e. un endettement explosif). L'hypothèse de positivité du taux d'intérêt nominal implique aussi que le ménage ne peut infinitement s'endetter pour financer sa consommation. L'hypothèse (2.18) assure quant à elle que l'espérance conditionnelle en  $t$  de tous les revenus futurs nominaux du ménage est borné. Dans le cas contraire, il disposerait d'une richesse infinie, pouvant financer une consommation infinie.

On peut montrer facilement que les préférences du ménage vérifient la monotonicité forte, qui implique l'hypothèse de non-saturation locale. Celle-ci justifie le passage de l'inégalité (2.15) à l'égalité

$$E_t(P_{t+k}C_{t+k} + B_{t+k}) = E_t((B_{t+k-1}(1+i_{t+k-1}) + W_{t+k}H_{t+k} + \Pi_{t+k}) \quad (2.19)$$

car le ménage juge sous-optimale une situation caractérisée par l'inégalité stricte. On peut montrer que cette égalité implique la *condition de transversalité* suivante (Preston (2006a)) :

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \prod_{l=1}^j \frac{1+i_{t+j}}{1+i_{t-1+l}} B_{t+j} = 0 \geq 0, \quad \forall t, \quad (2.20)$$

autrement dit, la valeur actualisée d'une richesse accumulée dans un avenir lointain est négligeable. Cette contrainte s'impose à chacun des ménages.

*Nous remarquons que ces contraintes sont conditionnées à la capacité des agents à calculer des anticipations rationnelles à un horizon très lointain et même théoriquement infini.*

Une fois l'existence de la solution assurée, nous procédons à la résolution de ce programme par les équations de Bellman (voir Walsh (2003b, pp. 80 et suivantes)). On définit la richesse financière réelle en  $t$  de chaque agent  $\omega_t$ , fonction des dotations en  $t-1$  :

$$\omega_t = C_t + \frac{B_t}{P_t} - \frac{W_t H_t}{P_t} = (1+i_{t-1}) \frac{B_{t-1}}{P_t} + \frac{\Pi_t}{P_t} \quad (2.21)$$

On note  $V(\omega_t)$  la fonction de valeur en termes réels qui donne la valeur présente maximale de l'utilité

qu'un ménage peut obtenir avec une richesse  $\omega_t$ . La fonction de valeur pour le problème de maximisation du ménage s'écrit alors :

$$V(\omega_t) = \max U_t(C_t, H_t) + \beta V [E_t(\omega_{t+1})] \quad (2.22)$$

sous les contraintes (2.13) et  $\omega_{t+1}$  donnée par (2.21). On exprime  $B_t$  en fonction de  $H_t$  et  $C_t$  :

$$B_t = P_t \omega_t - C_t P_t + W_t H_t \quad (2.23)$$

où l'on remarque que l'hypothèse d'anticipations rationnelles est nécessaire pour passer de la période  $t$  à la période  $t + 1$ . Le programme (2.22) n'est alors plus contraint et s'écrit :

$$V(\omega_t) = \max_{C_t, H_t} U_t(C_t, H_t) + \beta V [E_t(\omega_{t+1})] \quad (2.24)$$

avec :

$$E_t(\omega_{t+1}) = E_t \left( \frac{\Pi_{t+1}}{P_{t+1}} \right) + \frac{(1 + i_t)}{E_t(P_{t+1})} (\omega_t P_t - P_t C_t + W_t H_t) \quad (2.25)$$

Les conditions du premier ordre sont obtenues par rapport aux deux variables de la fonction objectif  $C$  et  $H$ . Par rapport à la consommation  $C_t$ , on a :

$$\frac{\partial U(C_t, H_t)}{\partial C_t} + \beta \frac{\partial E_t(V(\omega_{t+1}))}{\partial E_t(\omega_{t+1})} \frac{\partial E_t(\omega_{t+1})}{\partial C_t} = 0 \quad (2.26)$$

ce qui donne :

$$(C_t)^{-\sigma} = \beta \frac{\partial E_t(V(\omega_{t+1}))}{\partial E_t(\omega_{t+1})} \frac{P_t}{E_t(P_{t+1})} (1 + i_t) \quad (2.27)$$

Par le théorème de l'enveloppe, on a que :

$$\frac{\partial E_t(V(\omega_{t+1}))}{\partial E_t(\omega_{t+1})} = \frac{\partial E_t(U(C_{t+1}, H_{t+1}))}{\partial E_t(C_{t+1})} = (E_t(C_{t+1}))^{-\sigma} \quad (2.28)$$

ce qui donne la condition pour l'allocation intertemporelle optimale de la consommation, dite *condition d'Euler* :

$$1 + i_t = \beta^{-1} \left( \frac{C_t}{E_t(C_{t+1})} \right)^{-\sigma} \frac{E_t(P_{t+1})}{P_t}$$

(2.29)

La condition d'optimalité par rapport à l'offre de travail  $H_t$  donne :

$$\frac{\partial U(C_t, H_t)}{\partial H_t} + \beta \frac{\partial E_t(V(\omega_{t+1}))}{\partial E_t(\omega_{t+1})} \frac{\partial E_t(\omega_{t+1})}{\partial H_t} = 0 \quad (2.30)$$

On a donc :

$$(H_t)^\phi = \beta \frac{1+i_t}{E_t(P_{t+1})} W_t E_t(C_{t+1})^{-\sigma} \quad (2.31)$$

De la condition (2.29), on tire :

$$\beta E_t(C_{t+1})^{-\sigma} \frac{1+i_t}{E_t(P_{t+1})} = \frac{(C_t)^{-\sigma}}{P_t} \quad (2.32)$$

En combinant (2.31) et (2.32), on retrouve la condition d'optimalité intratemporelle sur un marché du travail en concurrence pure et parfaite :

$$\boxed{\frac{(H_t)^\phi}{(C_t)^{-\sigma}} = \frac{W_t}{P_t}} \quad (2.33)$$

qui égalise le taux marginal de substitution entre les loisirs et le travail au salaire réel. Les deux conditions (2.29) et (2.33) décrivent le comportement optimal que les ménages adoptent sur le marché du bien et sur le marché du travail. *La condition d'Euler* (2.29) introduit l'incertitude de la réalisation de l'état du monde en  $t+1$  et souligne l'importance des anticipations des agents. Les ménages agissent en prenant le niveau général des prix  $P$  et le taux d'intérêt nominal  $i$  comme fixés. Le premier provient du comportement des firmes, exposé ci-après, le second est fixé par la banque centrale et boucle le modèle.

## II.2 Comportement des firmes

Il existe un continuum de firmes indexées par  $j \in [0, 1]$ , dont chacune produit un seul bien différentié  $j$ <sup>9</sup>. Toutes les firmes utilisent *la même technologie* décrite par la fonction de production suivante (Gali (2008, p. 43)) :

$$y_t(j) = A_t (h_t(j))^{1-\alpha} \quad (2.34)$$

avec  $A_t$  le niveau technologique,  $\alpha$  le paramètre des rendements d'échelle et le travail  $h$  le seul facteur de production. L'absence de capital dans la fonction de production peut s'expliquer en faisant l'hypothèse que le capital est une dotation initiale exogène et égale pour chaque firme, non transférable d'une firme à l'autre et qu'il ne se déprécie pas, ni ne s'accumule (Woodford (2003b, p. 148)).  $A$  correspond au niveau technologique de l'ensemble de l'économie, partagé par toutes les firmes et évolue de manière exogène. On suppose le cas néoclassique standard  $0 < \alpha < 1$ , qui assure que les rendements sont décroissants. De plus, toutes les firmes sont confrontées à la *même demande* isoélastique décrite

---

9. Pour cette raison, nous gardons l'indice  $j$ .

par l'équation (2.11) ainsi qu'aux *mêmes conditions d'accès au marché du travail*. Ainsi, les firmes supportent les *mêmes coûts de production* donnés par :

$$\Psi_t(y_t(j)) = h_t(j)W_t \quad (2.35)$$

et font alors face au même programme d'optimisation. On suppose que les firmes individuelles ne sont pas conscientes de cet élément et prennent l'indice de prix agrégé  $P_t$  et l'indice de la consommation agrégée  $C_t$  comme donnés. Nous distinguons deux cas : un cadre de flexibilité parfaite des prix et un cadre de rigidité partielle des prix, et ce pour deux raisons. D'une part, le premier cadre est celui retenu dans notre modèle à base d'agents et d'autre part, il sert de référence à l'analyse du second. En effet, le niveau de production dit *naturel*  $Y_t^n$  ainsi que le *taux d'intérêt naturel* associé  $r_t^n$  correspondent au niveau qu'on observerait dans une économie caractérisée par une parfaite flexibilité des prix et servent de référence pour l'analyse de la dynamique du modèle sous prix partiellement rigides (cf. sous-section II.4.3).

### II.2.1 Tarification optimale en environnement de prix flexibles

Cette configuration correspond au cadre élémentaire de la concurrence monopolistique (voir notamment Dixit & Stiglitz (1977), Blanchard & Kiyotaki (1987)). Le programme de maximisation de chaque firme s'écrit :

$$\begin{aligned} & \max_{P_t^*} \{Y_t P_t^* - \Psi_t(Y_t)\} \\ & \text{s/c } Y_t = \left( \frac{P_t^*(j)}{P_t} \right)^{-\varepsilon} C_t \end{aligned} \quad (2.36)$$

avec  $Y_t$  et  $P_t^*$  la production et le prix optimal de chaque firme en  $t$ . Le programme de maximisation est commun à toutes les firmes, elles fixent alors toutes le même prix et vendent la même quantité c'est pourquoi nous omettons les indices  $j$ . Les variables individuelles des firmes intégrées sur le continuum  $[0, 1]$  donnent les variables agrégées. On obtient la condition du premier ordre :

$$(1 - \varepsilon) Y_t = -\varepsilon \psi_t(Y_t) (P_t^*)^{-1}$$

$$\Leftrightarrow P_t^* = (1 + \mu) \psi_t(Y_t)$$

(2.37)

avec  $(1 + \mu) \equiv \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} > 1$  et  $\psi_t(Y_t) \equiv \Psi'(Y_t) = \frac{W_t H_t^\alpha}{A_t(1-\alpha)}$ , i.e. le coût marginal nominal de la firme  $j$ . Le profit étant concave en les quantités  $Y_t$ , elles-mêmes fonction décroissante du prix  $P_t$ , la fonction de profit est concave en  $P_t$  et la solution (2.37) est assurée d'être un maximum. Les firmes fixent le

prix à chaque période tel qu'il y ait une marge  $\mu > 0$  sur le coût marginal nominal. Cette marge est commune à toutes les firmes puisque l'élasticité de substitution est la même entre tous les biens  $j$  et traduit donc le même pouvoir de marché.

### II.2.2 Tarification optimale en environnement de prix rigides

Les rigidités nominales sont introduites par la représentation proposée par Calvo (1983) : les opportunités de fixation des prix arrivent selon un processus exogène de Poisson. A chaque période, une proportion  $\theta$  des firmes doit continuer d'appliquer le prix en vigueur à la période précédente, alors qu'une proportion  $(1 - \theta)$  des firmes modifie son prix de vente et fixe le prix optimal  $p_t^*(j)$ . On note  $S_t$  l'ensemble des firmes qui ne peuvent pas ajuster leur prix à la période  $t$  (et  $\bar{S}_t$  l'ensemble complémentaire). Par hypothèse, les firmes de cet ensemble sont choisies de manière aléatoire et indépendante d'une période à l'autre parmi l'ensemble des firmes. Une firme a donc une probabilité  $1 - \theta$  de pouvoir modifier son prix à chaque période, la durée moyenne d'un prix étant alors égale à  $\frac{1}{1-\theta}$ . L'existence d'un très grand nombre de firmes garantit la validité de la loi des grands nombres. On peut alors considérer que la moyenne des prix appliqués par les firmes appartenant à  $S_t$  correspond à la moyenne des prix appliqués par la totalité des firmes en  $t - 1$ , soit  $P_{t-1}$ . Dans ces conditions, l'indice des prix  $P_t \equiv \left( \int_0^1 p_t(j)^{1-\varepsilon} dj \right)^{\frac{1}{1-\varepsilon}}$  s'écrit :

$$\begin{aligned} P_t &= \left( \int_{S_t} P_{t-1}^{1-\varepsilon} dj + \int_{\bar{S}_t} (p_t^*(j))^{1-\varepsilon} dj \right)^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \\ &= \left( \int_0^{1-\theta} (p_t^*(j))^{1-\varepsilon} dj + \int_{1-\theta}^1 P_{t-1}^{1-\varepsilon} dj \right)^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \\ &= \left( \theta P_{t-1}^{1-\varepsilon} + (1 - \theta)(P_t^*)^{1-\varepsilon} \right)^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \end{aligned} \quad (2.38)$$

En réarrangeant, on obtient :

$$\Xi_t^{1-\varepsilon} = \theta + (1 - \theta) \left( \frac{P_t^*}{P_{t-1}} \right)^{1-\varepsilon}, \quad (2.39)$$

avec  $\Xi_t \equiv \frac{P_t}{P_{t-1}}$  le taux d'inflation brut.

Toutes les firmes qui peuvent ajuster leur prix en  $t$  font face à la même situation et choisissent donc toutes le même prix (c'est pourquoi nous omettons les indices  $j$ ) : elles choisissent un prix  $P_t^*$  qui maximise la valeur actualisée en  $t$  de leur profit cumulé pendant que ce prix reste en vigueur. Elles

font face au problème suivant :

$$\begin{aligned} & \max_{P_t^*} \sum_{k=0}^{\infty} \theta^k E_t \{ Q_{t,t+k} \left( P_t^* Y_{t+k|t} - \Psi_{t+k}(Y_{t+k|t}) \right) \} \\ & s/c \quad Y_{t|t+k} = \left( \frac{P_t^*}{P_{t+k}} \right)^{-\varepsilon} C_{t+k} \quad \forall k \geq 0 \end{aligned} \quad (2.40)$$

avec  $\theta^k$  la probabilité que le prix  $P_t^*$  choisi en  $t$  reste en vigueur à la période  $t+k$ ,  $Y_{t+k|t}$  la production de la période  $t+k$  d'une firme qui n'a pas modifié son prix depuis  $t$  et  $E_t Q_{t,t+k} \equiv E_t \left( \prod_{n=1}^k \frac{1}{1+i_{t+n-1}} \right)$ ,  $k > 0$ , le taux d'actualisation entre les périodes  $t$  et  $t+k$ . De même, la fonction objectif du programme (2.40) est concave en  $Y_{t|t+k}$ ,  $\forall k \geq 0$ , fonction décroissante du prix  $P_t^*$ , ce qui assure que l'objectif est concave en  $P_t^*$  et que la condition du premier ordre suivante est un maximum :

$$\boxed{\sum_{k=0}^{\infty} \theta^k E_t \{ Q_{t,t+k} Y_{t+k|t} \left( P_t^* - (1 + \mu) \psi_{t+k|t} \right) \} = 0} \quad (2.41)$$

avec  $\psi_{t+k|t} \equiv \Psi'_{t+k}(Y_{t+k|t}) = \frac{W_{t+k} N_{t+k}^\alpha}{A_{t+k}(1-\alpha)}$  le coût marginal nominal à la période  $t+k$  d'une firme qui n'a pas modifié son prix de vente depuis  $t$ . Le facteur  $(1 + \mu) \equiv \frac{\varepsilon}{\varepsilon-1} > 1$  s'interprète comme le *markup désiré* brut ou le *markup sans frictions*. Le prix optimal  $P_t^*$  est fixé tel qu'il soit égal à la valeur espérée actualisée des coûts marginaux futurs auxquels la firme applique la marge  $\mu$ . Dans le cas limite de flexibilité des prix où  $\theta = 0$ , on retrouve les résultats de la concurrence monopolistique (équation (2.37)). L'équation (2.41) indique que les firmes qui peuvent modifier leur prix de vente en  $t$  choisissent un prix qui correspond au markup désiré appliqué au coût marginal courant et aux anticipations de la valeur actualisée des futurs coûts marginaux nominaux pour toutes les périodes  $t+k$ ,  $k \geq 0$ , pondérées par  $\theta^k$ , la probabilité qu'elles doivent encore utiliser le prix  $P_t^*$  en  $t+k$ .

### II.3 Comportement des autorités monétaires

Le modèle est clos par une équation qui décrit la manière dont la banque centrale fixe le taux d'intérêt nominal  $i$ , soit sous une forme générale :

$$1 + i_t = \phi \left( \frac{\Xi_t}{\Xi_t^*}, \frac{Y_t}{Y_t^*} \right) \quad (2.42)$$

où  $\Xi_t^*$  représente l'objectif brut d'inflation et  $Y_t^*$  l'objectif de production. Un choc est parfois ajouté à cette règle pour modéliser la composante non-systématique de la politique monétaire. Nous ne considérons pas ce type de chocs dans la suite de l'analyse (voir la sous-section II.5 pour un détail de l'analyse des chocs dans le modèle). Notons que la relation (2.42) se vérifie en environnement de prix

partiellement rigides. En situation de prix flexibles, la détermination de l'inflation dans le modèle fait débat : pour Woodford (2008), l'inflation à l'état stationnaire est donnée par le terme constant de la règle (2.42), pour Nelson (2008), elle est déterminée par le taux de croissance de la masse monétaire à long terme.

## II.4 Equilibres

Une situation d'équilibre, que ce soit dans un contexte de rigidité ou de flexibilité des prix, est notamment caractérisée par un équilibre simultané sur tous les marchés, i.e. une absence d'offre ou de demande excédentaire.

### II.4.1 Marché du travail

Le taux de salaire s'ajuste pour assurer à chaque période l'égalité entre l'offre de travail des ménages et la demande de travail des firmes (Gali (2008, pp. 17-18)). Il s'agit donc d'un marché en situation de concurrence pure et parfaite où firmes et ménages sont preneurs de salaire. La condition d'apurement sur le marché du travail est :

$$H_t = \int_0^1 h_t(j) dj \quad (2.43)$$

### II.4.2 Marchés des biens

En l'absence de dépenses publiques, la condition d'apurement des marchés des biens est<sup>10</sup> :

$$y_t(j) = c_t(j), \quad (2.44)$$

pour tout  $j \in [0, 1]$  et pour toute période  $t$ . Avec l'indice de la production agrégée  $Y_t \equiv \left( \int_0^1 y_t(j)^{1-\frac{1}{\varepsilon}} dj \right)^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$ , on obtient pour tout  $t$  :

$$Y_t = C_t. \quad (2.45)$$

Le fait que l'égalité (2.45) soit vérifiée en contexte de prix flexibles comme dans un environnement de prix partiellement rigides indique que *l'ajustement sur le marché des biens se fait par les quantités*. En effet, le niveau de production est déterminée par la demande et l'offre s'y ajuste mécaniquement. C'est une des composantes Keynésiennes du modèle (Woodford (2003b, p. 155)). Lorsqu'une firme ne peut modifier son prix, elle doit tout de même produire la demande qui s'adresse à elle, en embauchant le travail nécessaire, et cela au taux de salaire qui s'impose à elle sur le marché du travail, donc en

---

10. Nous avons déjà implicitement fait appel à cette condition pour passer de l'équation de demande (2.11) à la contrainte des firmes (2.36) et (2.40).

subissant les coûts de production nécessaires à la satisfaction de sa demande. C'est son profit qui varie et peut être ainsi inférieur au taux de profit optimal qu'elle aurait obtenu si elle avait pu réviser son prix.

### II.4.3 Equilibres en anticipations rationnelles

Woodford (2003b, pp. 241-242) définit alors un équilibre en anticipations rationnelles dans ce modèle comme :

**En prix parfaitement flexibles** un ensemble de processus  $\{Y_t\}$ ,  $\{P_t\}$  et  $\{i_t\}$  qui remplit la condition du premier ordre qui prescrit le comportement intertemporel des ménages (équations (2.29)) couplée aux conditions de transversalité (2.16)-(2.17)-(2.18) ainsi qu'à la règle de détermination du taux d'intérêt nominal (2.42) et aux conditions  $P_t = P_t^*$  (équation (2.37)) et  $Y_t = Y_t^n$ . Le *produit* dit *naturel*,  $Y_t^n$ , représente le niveau de production dans un environnement de prix parfaitement flexibles et parfaitement stables. Ce niveau de production est fonction du niveau technologique  $A_t$ , qui évolue de manière exogène, et des coefficients structurels du modèle  $\mu$ ,  $\alpha$ ,  $\sigma$  et  $\phi$  (voir Gali (2008, p. 48)). Pour voir cela, il suffit de combiner la condition d'optimalité sur le marché du travail (2.33) qui définit le salaire réel, la tarification optimale des firmes dans un contexte de prix flexibles (2.37) et l'équation d'apurement sur le marché des biens (2.45) pour obtenir :

$$\frac{P_t^*}{P_t} = (1 + \mu) \left( \frac{W_t}{P_t} \frac{H_t^\alpha}{(1 - \alpha)P_t} \right) \quad (2.46)$$

et comme toutes les firmes fixent le même prix et produisent les mêmes quantités dans ce contexte, on a  $P_t^* = P_t \forall t$  puis en remplaçant  $H_t$  par  $Y_t$  via la fonction de production (2.34), on a :

$$(Y_t^n)^{\sigma + \frac{\phi + \alpha}{1 - \alpha}} = \frac{1 - \alpha}{1 + \mu} A_t^{\frac{1 + \phi}{1 - \alpha}} \quad (2.47)$$

A long terme, le produit naturel atteint un niveau d'*état stationnaire* dans lequel la technologie  $A$  est constante (Preston (2006b, p. 118)). Pour simplifier le raisonnement, Woodford (2003b, p. 225) fixe le niveau de long terme de la technologie à  $A = 1$ . A l'état stationnaire, le produit naturel est constant, noté  $\bar{Y}$ , et fonction uniquement des paramètres structurels (constants) du modèle :

$$\bar{Y}^{\sigma + \frac{\phi + \alpha}{1 - \alpha}} = \frac{1 - \alpha}{1 + \mu} \quad (2.48)$$

A l'état stationnaire, les prix et la consommation sont constants (i.e.  $C_t = E_t(C_{t+1}) = \bar{C}$  et  $P_t = E_t(P_{t+1}) = \bar{P}$ ), et par la courbe IS (2.29), on a que le taux d'intérêt réel associé à cet état stationnaire  $\bar{r}$  vaut  $\bar{i} - \pi^* = \frac{\Xi^* - \beta}{\beta} - \pi^*$  dans le cas général d'une cible d'inflation non-nulle. Si

la cible d'inflation  $\pi^*$  est nulle, nous avons  $\bar{r} = \bar{i} = \frac{1-\beta}{\beta}$ . Ce résultat vient du fait que, même à production et prix constants, le taux d'intérêt reste positif à cause de la préférence pour le présent des ménages : une unité de bien non-consommée aujourd'hui est valorisée  $\beta < 1$  demain par le ménage mais lui rapporte  $(1 + \bar{i})$  unité de consommation du bien. On a donc  $\bar{i} = \frac{1-\beta}{\beta}$ .

**En prix partiellement rigides** un ensemble de processus  $\{Y_t\}$ ,  $\{P_t\}$  et  $\{i_t\}$  qui remplissent les conditions du premier ordre qui prescrivent les comportements intertemporels des ménages et des firmes (équations (2.29) et (2.41)) couplées aux conditions de transversalité (2.16)-(2.17)-(2.18) ainsi qu'à l'équation de détermination du niveau général des prix (2.39) et du taux d'intérêt nominal (2.42).

Ces deux définitions s'entendent entre autres étant donné une créance publique  $\{B_t\}$  exogène non-explosive.

## II.5 Chocs et ajustements

Ces équations non-linéaires ne sont pas très aisées à manipuler. Pour cette raison, les auteurs travaillent souvent avec des versions linéarisées de celles-ci. A condition que les variables  $Y$ ,  $\pi$  et  $i$  restent proches de leurs valeurs d'état stationnaire, définies ci-dessus (respectivement  $\bar{Y}$ , 0 et  $\beta^{-1} - 1$ ), on peut obtenir une log-linéarisation au voisinage de cet état de la condition d'Euler (2.29), de l'équation de fixation des prix (2.41) et de la règle de taux d'intérêt (2.42)<sup>11</sup>.

**Equation de demande agrégée** En remplaçant (2.45) dans (2.29), on obtient pour la première (Gali (2008, p. 49), Woodford (2003b, p. 246)) :

$$x_t = E_t(x_{t+1}) - \frac{1}{\sigma}(i_t - E_t(\pi_{t+1}) - r_t^n) \quad (2.49)$$

avec  $\pi_t \equiv \ln P_t - \ln P_{t-1}$  le taux d'inflation entre  $t-1$  et  $t$ ,  $x_t \equiv \ln Y_t - \ln Y_t^n$  l'écart de production, i.e. l'écart entre le produit effectif en  $t$  obtenu en environnement de prix partiellement rigides et celui qui prévaudrait si les prix étaient parfaitement flexibles (Woodford (2003b, p. 245)) et  $r_t^n \equiv \bar{r} + \sigma(E_t(y_{t+1}^n - y_t^n))$  le taux d'intérêt réel naturel, i.e. en prix parfaitement flexibles. C'est le taux correspondant à un niveau de demande agrégée coïncidant au produit naturel  $Y_t^n$  (Woodford (2003b, p. 247)). L'écart entre le taux d'intérêt réel  $ex ante$   $i_t - E_t(\pi_{t+1})$  et le taux d'intérêt naturel  $r_t^n$  résume les effets des rigidités nominales dans le modèle. *L'équation (2.49) est une relation de type IS de Hicks*

11. Le fait de log-linéariser au voisinage d'un état caractérisé par une inflation nulle, i.e.  $\Xi^* = 1$ , n'empêche pas d'analyser la dynamique de l'économie lorsque l'inflation fluctue autour d'une cible strictement positive, à condition que cette cible reste suffisamment proche de zéro. C'est notamment le cas des cibles d'inflation retenues empiriquement par les banques centrales (Woodford (2003b, p.179)).

(1937) dans un modèle d'équilibre général avec optimisation intertemporelle car elle décrit une relation inverse entre la production agrégée (qui provient de la demande agrégée) et le taux d'intérêt réel ex ante (Woodford (2003b, p. 242)). Cette courbe IS se vérifie en environnement de prix parfaitement flexibles comme partiellement rigides.

L'équation (2.49) est parfois présentée sous la forme peut-être plus intuitive (Clarida et al. (1999) :

$$x_t = E_t(x_{t+1}) - \frac{1}{\sigma}(i_t - E_t(\pi_{t+1}) - \bar{r}) + g_t \quad (2.50)$$

où  $g_t \equiv E_t(y_{t+1}^n) - y_t^n$  désigne une perturbation due à l'évolution du produit naturel. Cette évolution provient de *chocs réels exogènes*. Ces chocs peuvent se porter sur la fonction d'utilité de la consommation (donc une modification du paramètre  $\sigma$ ), sur la fonction de désutilité du travail (donc une modification du paramètre  $\phi$ ) ou sur le niveau technologique (donc sur le paramètre  $A$  de la fonction de production (2.34)). Ces chocs font varier respectivement la demande de bien en modifiant l'utilité marginale de la consommation, les conditions sur le marché du travail en influençant la désutilité marginale du travail et l'offre de bien en affectant la productivité des firmes. Ces chocs font fluctuer le produit naturel  $Y_t^n$ , i.e. le produit obtenu dans un environnement de prix parfaitement flexibles, autour de son état stationnaire  $\bar{Y}$ . En conséquence, le taux naturel  $r_t^n$  fluctue autour de son niveau stationnaire  $\bar{r}$ . Ces chocs ne sont pas à proprement parler des chocs de demande même s'ils ont un impact sur la courbe IS car ils affectent les niveaux naturels de la production et du taux naturel et affectent en conséquence aussi les conditions d'offre (Woodford (2003b, p. 246)). Enfin, ces chocs doivent être de faible ampleur pour que l'approximation log-linéaire reste pertinente.

**Equation d'offre agrégée** La log-linéarisation des deux équations (2.39) et (2.41) qui décrivent la dynamique des prix *en environnement de prix rigides* permet d'obtenir une courbe de Phillips augmentée des anticipations (Phelps (1967), Friedman (1968)), c'est-à-dire une relation qui lie positivement l'inflation courante à l'inflation anticipée et au niveau de production courant (Woodford (2003b, chap. 3) et Gali (2008, pp. 46-49)). D'une part, par log-linéarisation de (2.39) autour de l'état naturel caractérisé par la stabilité parfaite des prix (i.e. avec  $\Xi_t = 1$  et  $\frac{P_t^*}{P_{t-1}} = 1$  pour tout  $t$ ), on obtient :

$$\pi_t = (1 - \theta)(p_t^* - p_{t-1}) \quad (2.51)$$

avec  $\pi_t = \ln P_t - \ln P_{t-1}$ ,  $\ln P_t^* = p_t^*$  et  $\ln P_{t-1} = p_{t-1}$ . En soustrayant aux deux membres de l'équation (2.51) le terme  $(1 - \theta)p_t$ , avec  $p_t \equiv \ln P_t$ , on obtient :

$$\pi_t \simeq \frac{\theta}{1 - \theta}(p_t^* - p_t) \quad (2.52)$$

Pour la suite du raisonnement, nous notons  $\hat{p}_t^* \equiv p_t^* - p_t$  le rapport en logarithme du prix optimal fixé par les firmes qui ajustent leurs prix en  $t$  au niveau général des prix en  $t$ . A l'état stationnaire, ce rapport vaut 1 puisque toutes les firmes ajustent leurs prix à chaque période et fixent le même prix.

D'autre part, nous réécrivons la condition du premier ordre des firmes (2.41) en divisant par  $P_{t-1}$  et en définissant  $\Xi_{t,t+k} \equiv \frac{P_{t+k}}{P_t}$  :

$$\sum_{k=0}^{\infty} \theta^k E_t \left\{ Q_{t,t+k} Y_{t+k|t} \left( \frac{P_t^*}{P_{t-1}} - (1 + \mu) RMC_{t+k} \Xi_{t-1,t+k} \right) \right\} = 0 \quad (2.53)$$

avec  $RMC_{t+k} = \frac{\psi_{t+k|t}}{P_{t+k}}$ , le coût marginal réel d'une firme en  $t+k$  qui a ajusté son prix pour la dernière fois en  $t$ . On sait qu'à l'état stationnaire, les prix sont constants (égaux à  $\bar{P}$ ), ainsi que la production et les coûts marginaux car toutes les firmes produisent la même quantité au même prix. On sait qu'à cet état, le facteur d'actualisation vaut  $\frac{1}{(1+i)^k} = \beta^k$  entre les périodes  $t$  et  $t+k$  et que le coût marginal nominal vaut  $\frac{\bar{P}}{1+\mu}$  donc le coût marginal réel vaut  $R\bar{MC} = \frac{1}{1+\mu}$ . Un développement de Taylor à l'ordre 1 au voisinage de l'état stationnaire de (2.53) vaut alors :

$$p_t^* = (1 - \theta\beta) \sum_{k=0}^{\infty} (\theta\beta)^k E_t (r\hat{mc}_{t+k} + p_{t+k}) \quad (2.54)$$

avec  $r\hat{mc}_{t+k} \equiv \ln(RMC_{t+k}) - \ln(R\bar{MC})$  la déviation en logarithme du coût marginal réel par rapport à sa valeur d'état stationnaire ( $\ln(R\bar{MC}) = \ln\left(\frac{1}{1+\mu}\right) \simeq -\mu$ , à condition que  $\mu$  soit petit).

Nous mobilisons ensuite deux hypothèses de l'opérateur d'anticipations rationnelles. D'une part, la parfaite observabilité des variables courantes qui assure que  $E_t(X_t) = X_t$  pour toute variable  $X$  et d'autre part, la loi des projections itérées qui donne  $E_t(E_{t+1}(\dots)) = E_t(\dots)$ . Elle dérive du fait que l'information disponible en  $t$ ,  $I_t$ , sur laquelle s'appuie l'espérance  $E_t(\cdot)$  est incluse dans l'information en  $t+1$  sur laquelle s'appuie l'espérance  $E_{t+1}(\cdot)$ , etc..., i.e.  $I_t \subset I_{t+1} \subset I_{t+2} \dots$  (Salge (1997))<sup>12</sup>. On peut écrire :

$$p_t^* = (1 - \theta\beta)(r\hat{mc}_t + p_t) + (1 - \theta\beta) \sum_{k=1}^{\infty} (\theta\beta)^k E_t (r\hat{mc}_{t+k} + p_{t+k})$$

---

12. Cette propriété est vérifiée à condition que les attributs des autres agents soient connaissance commune, dans la mesure où l'opérateur  $E$  s'applique aux variables agrégées. Preston (2006b) considère un cas où la loi des espérances itérées est vérifiée au niveau individuel, mais pas au niveau agrégé parce que la condition d'apurement des marchés (2.45) et les préférences ainsi que les dotations des agents ne sont pas connaissance commune. Les agents ne sont donc pas dans la possibilité de déduire la vraie loi de probabilité des variables agrégées. Dans ce cas, les sommes infinies ne peuvent se réduire à l'anticipation valable pour la période suivante et sont maintenues dans les dynamiques des variables agrégées.

qui, après un changement d'indice, peut se réécrire :

$$p_t^* = (1 - \theta\beta)(r\hat{m}c_t + p_t) + \theta\beta(1 - \theta\beta) \sum_{j=0}^{\infty} (\theta\beta)^j E_t(r\hat{m}c_{t+j+1} + p_{t+j+1})$$

et en notant que par la loi des projections itérées, on peut écrire *via* (2.54) :

$$\begin{aligned} E_t(p_{t+1}^*) &= E_t \left( (1 - \theta\beta) \sum_{k=0}^{\infty} (\theta\beta)^k E_{t+1}(r\hat{m}c_{t+k+1} + p_{t+k+1}) \right) \\ &= (1 - \theta\beta) \sum_{k=0}^{\infty} (\theta\beta)^k E_t(r\hat{m}c_{t+k+1} + p_{t+k+1}) \end{aligned}$$

on a enfin :

$$p_t^* = (1 - \theta\beta)(r\hat{m}c_t + p_t) + \theta\beta E_t(p_{t+1}^*) \quad (2.55)$$

En retranchant  $p_t$  de chaque côté, on obtient :

$$\hat{p}_t^* = (1 - \theta\beta)(r\hat{m}c_t) + \theta\beta E_t(\pi_{t+1}) + \theta\beta E_t(p_{t+1}^*) \quad (2.56)$$

puis en combinant avec l'équation (2.51), on arrive à :

$$\pi_t = \frac{(1 - \theta\beta)(1 - \theta)}{\theta} r\hat{m}c_t + \beta E_t(\pi_{t+1}) \quad (2.57)$$

Nous voyons que plus  $\beta$  est élevé, plus les firmes placent de poids sur les profits futurs et moins l'inflation est sensible au coût marginal courant. Il en est de même si  $\theta$  est fort, i.e. si les prix sont fortement rigides. Dans ce cas, les firmes auront moins d'opportunités d'ajuster leur prix dans le futur.

Il nous reste une dernière étape : déterminer une relation entre l'écart de production  $x_t$  et l'écart entre le coût marginal et sa valeur à l'état naturel  $r\hat{m}c_t$ . En combinant le salaire réel d'équilibre donné par la condition (2.33) sur le marché du travail et l'expression du coût marginal réel, de manière similaire au calcul du produit naturel (équation (2.47)), on obtient :

$$RMC_t(Y_t) = \frac{Y_t^{\frac{\phi+\alpha}{1-\alpha} + \sigma}}{(1 - \alpha) A_t^{\frac{-1-\phi}{1-\alpha}}} \quad (2.58)$$

et en log-linéarisant :

$$rmc_t(y_t) = \left( \frac{\phi + \alpha}{1 - \alpha} + \sigma \right) y_t - \frac{1 + \phi}{1 - \alpha} \ln(A_t) - \ln(1 - \alpha) \quad (2.59)$$

On soustrait ensuite au coût marginal  $rmc_t(y_t)$  sa valeur correspondante à l'état naturel  $rmc_t(y_t^n)$  et

on a :

$$r\hat{mc}_t \equiv rmc_t(y_t) - rmc_t(y_t^n) = \left( \frac{\phi + \alpha}{1 - \alpha} + \sigma \right) (y_t - y_t^n) = \left( \frac{\phi + \alpha}{1 - \alpha} + \sigma \right) x_t \quad (2.60)$$

On remplace enfin (2.60) dans l'équation (2.57) et la relation obtenue correspond à la nouvelle courbe de Phillips, augmentée des anticipations :

$$\pi_t = \beta E_t \pi_{t+1} + \kappa x_t \quad (2.61)$$

où  $\kappa \equiv \frac{(1-\theta\beta)(1-\theta)}{\theta} \left( \frac{\phi+\alpha}{1-\alpha} + \sigma \right) > 0$  représente l'élasticité de l'écart de production à l'inflation. L'équation (2.61) traduit les conditions d'offre (Woodford (2003b, p. 187)). Cependant, avec l'équation (2.61), l'inflation et l'écart de production évoluent de pair et stabiliser l'inflation revient à stabiliser l'écart de production et vice-versa. Pour introduire un *arbitrage entre les deux objectifs*, un choc  $u_t$  est ajouté de manière *ad-hoc* à la courbe de Phillips. Il peut être justifié de plusieurs manières. Woodford (2003b, p. 450) l'interprète comme un choc sur  $\varepsilon$ , l'élasticité de substitution entre les différents biens  $j$ , qui fait ainsi varier le pouvoir de marché des firmes et par là leur marge  $\mu$ . Clarida et al. (1999) parlent de variations dans la technologie, la structure du marché du travail ou les préférences des ménages qui modifient la relation de proportionnalité entre les coûts marginaux des firmes et l'écart de production (équation (2.60)), nécessaire à la dérivation de l'équation (2.61). Ils citent notamment (p. 1667) des mouvements dans les salaires nominaux expliqués par des frictions dans le processus de fixation des contrats salariaux entre les firmes et les ménages. Les chocs  $u$  peuvent ainsi traduire l'effet des effets dits de *second tour*, par lesquels une hausse anticipée de l'inflation se répercute sur l'inflation effective via la hausse des salaires nominaux. Ces chocs  $u$  touchent directement l'inflation, sans passer par un impact sur les variables naturelles  $Y^n$  et  $r^n$ , contrairement aux chocs réels  $g$ .

Le modèle NK de base est donc décrit par une simple structure dans laquelle

i) la relation (2.49) donne le processus de l'écart de production  $\{x_t\}$  en fonction du processus exogène du taux naturel, du processus du taux d'intérêt réel (dans lequel la banque centrale fixe le taux d'intérêt nominal (équation (2.42)) et des anticipations de l'écart de production à la période suivante ;

et ii) la relation (2.61) donne le processus de l'inflation  $\{\pi_t\}$  en fonction de celui de l'écart de production et de l'anticipation pour la période suivante de l'inflation (Gali (2008, p. 48)).

L'effet de la politique monétaire passe alors par deux canaux. Le premier est celui de la *consommation*, par l'équation d'Euler : une variation du taux d'intérêt nominal, à anticipations d'inflation données, permet de faire varier le taux d'intérêt réel *ex ante* et par là la demande. Comme la production est déterminée par la demande, une augmentation (resp. diminution) du taux d'intérêt affecte

alors négativement (resp. positivement) la production (Walsh (2003c, p. 248)).

Le second est celui des *anticipations*, anticipation d'inflation et d'écart de production. Leur rôle est fondamental, elles apparaissent en effet dans les deux équations qui résument le modèle (équations (2.49) et (2.61)). Une hausse des anticipations d'inflation entraîne une hausse de l'inflation courante (équation (2.61)), *via* le comportement de fixation des prix des firmes en environnement de prix partiellement rigides. L'intuition est la suivante : les firmes fixent leur prix courant en fonction de l'anticipation de leurs taux de profit futurs, qui dépendent de leurs prix relatifs futurs. Si les entreprises anticipent un taux d'inflation positif sur les périodes futures, le niveau de leur prix relatif diminuera dans le temps en raison de cette inflation. Elles fixent donc à l'avance un prix individuel plus élevé que le justifie le niveau général des prix, pour se prémunir de cette baisse de leur prix relatif. Cet effet provoque effectivement une hausse de l'inflation (un raisonnement similaire tient en cas d'anticipation d'un taux d'inflation négatif). Les anticipations interviennent aussi sur la dynamique de l'économie par le comportement des ménages. En effet, une hausse des anticipations d'inflation affecte (positivement) l'écart de production par une baisse dans le taux d'intérêt réel *ex ante* et vice-versa (équation (2.49)). Par ailleurs, une hausse anticipée de l'écart de production produit directement une hausse de l'écart de production courant (équation (2.61)) : les agents anticipent une augmentation du produit, donc un enrichissement et sont alors poussés à augmenter leur consommation courante (et vice-versa).

Ce déroulement détaillé du modèle NK nous a permis d'expliciter son fonctionnement et surtout le rôle des hypothèses qui y sont nécessaires, en particulier anticipations rationnelles, information parfaite, homogénéité des agents et contraintes *top-down* sur les variables endogènes. Dans la section suivante, nous exposons la manière dont nous partons du cadre NK pour construire un modèle à base d'agents qui s'affranchit de ces hypothèses. A chaque fois, nous soulignons les similitudes ainsi que les divergences et montrons les ponts qu'il est possible de faire entre les deux cadres d'analyse. Ceci permet aussi d'expliciter les difficultés rencontrées dans la transposition du cadre analytique à un modèle à base d'agents et de justifier les contraintes introduites dans ce dernier.

### III Elaboration du modèle conceptuel

Les logiques internes des modèles NK et à base d'agents sont très différentes. Les modèles analytiques sont résolus de manière simultanée. Au contraire, les modèles à base d'agents ne peuvent pas être résolus en calculant les points fixes qui sont déterminés par les conditions d'équilibre imposées *ex ante*, ils sont donc séquentiels par nature et la séquence des événements peut être décrite étape par étape. Nous allons tout de même présenter le modèle conceptuel de la même manière que le modèle

NK de base. En effet, leurs structures sont délibérément proches : ce sont celles d'un simple modèle de (dés)équilibre général, avec une offre et une demande agrégées, augmenté d'une règle de taux d'intérêt, dans laquelle le marché du bien est en situation de concurrence imparfaite et l'ajustement des prix et des salaires est caractérisé par des rigidités nominales. Nous faisons abstraction des dépenses publiques et de la politique fiscale.

La figure 2.2 décrit le fonctionnement du modèle conceptuel de manière séquentielle et le schéma 2.3 représente son fonctionnement par agent – ménages, firme et banque centrale, ainsi que les flux entre eux. D'abord, le marché du travail a lieu : il confronte l'offre de travail des ménages à la demande de travail de la firme et détermine ainsi la quantité de travail embauchée et respectivement, le taux de chômage. A partir de la quantité de travail embauchée, la firme produit une offre de bien. Les revenus salariaux des ménages (qui sont réciproquement les coûts de production de la firme) sont calculés et la firme fixe le prix de vente du bien à partir de ces coûts. Ensuite, les ménages fixent leur demande de bien à partir de leur revenu et du niveau du taux d'intérêt en fixant une stratégie d'épargne ou d'endettement. Puis, le marché du bien confronte l'offre et la demande pour le bien et détermine sur la base des transactions effectives les profits de la firme, lesquels sont reversés aux ménages. On obtient également la consommation effective de chaque ménage, à partir de laquelle on calcule son utilité. Les ménages révisent ensuite leur stratégie d'épargne/endettement et de salaire désiré sur la base de l'utilité obtenue, et la firme met à jour sa demande de travail en fonction de son taux de profit. Enfin, la banque centrale révise le taux d'intérêt nominal en fonction du taux de chômage et du taux d'inflation dans l'économie, et la période suivante se réalise<sup>13</sup>. Nous laissons pour le moment de côté la problématique de la formation des anticipations d'inflation des ménages et y revenons aux chapitres 3 et 4.

Comme il a été souligné plus haut, une parfaite correspondance entre le cadre d'analyse à base d'agents et les modèles analytiques comme le modèle NK s'avère impossible. Les caractéristiques propres à chacun d'eux peuvent se montrer incompatibles et il est important de ne pas trop complexifier le modèle conceptuel dès le départ, sous peine de ne pouvoir obtenir un modèle minimal parcimonieux. Ainsi, les divergences entre les deux cadres d'analyse et les hypothèses simplificatrices qui se sont imposées sont explicitées dans des encadrés spécifiques tout au long de la section. Ces encadrés répondent à une volonté de transparence : ils permettent d'expliquer clairement les obstacles rencontrés ainsi que leurs causes et les solutions retenues pour les contourner. Nous pensons aussi que ces éléments peuvent aider d'autres chercheurs qui explorent des dimensions proches de la nôtre et

---

13. Sur le schéma 2.2, la dernière étape correspond à l'actualisation des anticipations d'inflation des ménages. Le cœur du modèle conceptuel que nous exposons dans cette section suppose les anticipations fixées, nous ne considérons leur endogénération qu'après le processus de validation du modèle, cf. section III du chapitre 3.

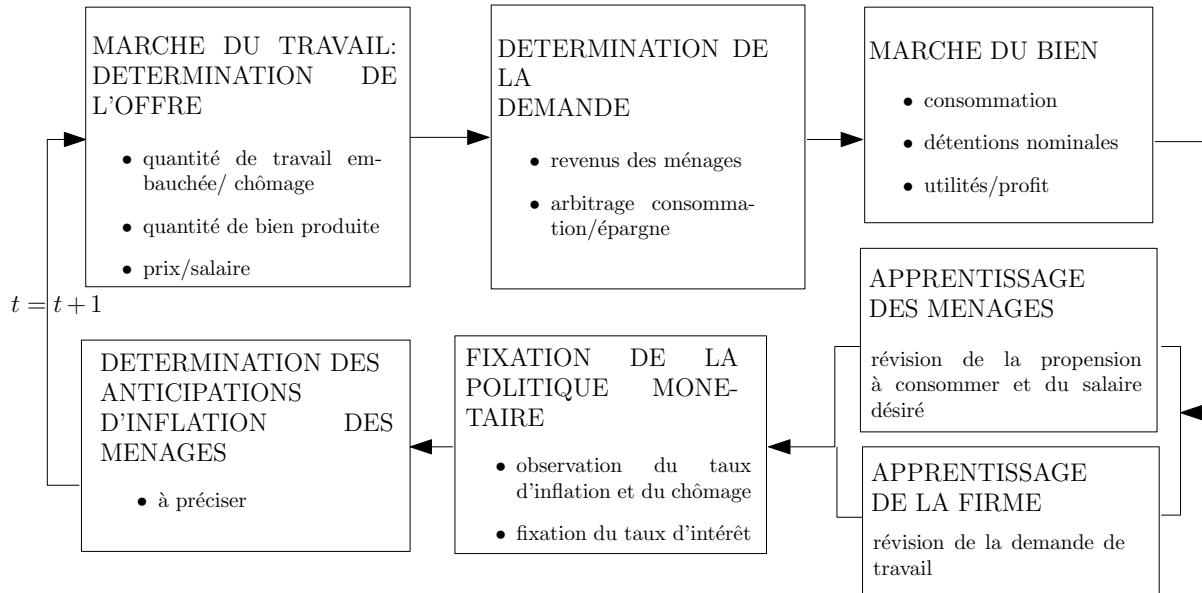


FIGURE 2.2 – Déroulement du modèle

sont confrontés à des problèmes similaires. A chaque sous-section, les paramètres du modèle discutés lors de la validation du modèle au 3 sont également mis en évidence.

### III.1 Comportement des ménages

L'économie est peuplée de  $n$  ménages, indexés par  $i$ ,  $i \in \llbracket 1, n \rrbracket$ <sup>14</sup>.

**Offre de travail et détermination des salaires** Chaque agent est doté d'une offre de travail inélastique, normalisée à une unité :

$$h_{i,t}^s = 1, \forall i, t \quad (2.62)$$

L'équation (2.62) indique que les ménages ne peuvent pas offrir plus d'une unité de travail chaque période au secteur productif. La réalisation du marché du travail, qui confronte offre de travail des ménages et demande de travail du secteur productif détermine ensuite la quantité effective de travail  $h_i$  que le ménage fournit, ce qui implique  $h_i \leq 1$ . Il y a donc  $n$  unités de travail au maximum dans l'économie. Ceci nous permet de définir explicitement le niveau de chômage. Cette hypothèse est courante dans des travaux proches de notre modèle, voir notamment Oeffner (2008), Gaffeo et al. (2008), Raberto et al. (2007, 2008) ou Mandel et al. (2010). L'encadre 2.2, page 90 explique la genèse

14. Les lettres majuscules désignent les variables agrégées et les minuscules les variables individuelles des ménages. Nous maintenons les indices  $i$  car les ménages sont hétérogènes, tant dans leur dotation que dans leurs stratégies. Les variables sont notées avec l'exposant  $s$  pour les agents du côté offreur des marchés et l'exposant  $d$  pour ceux du côté demandeur.

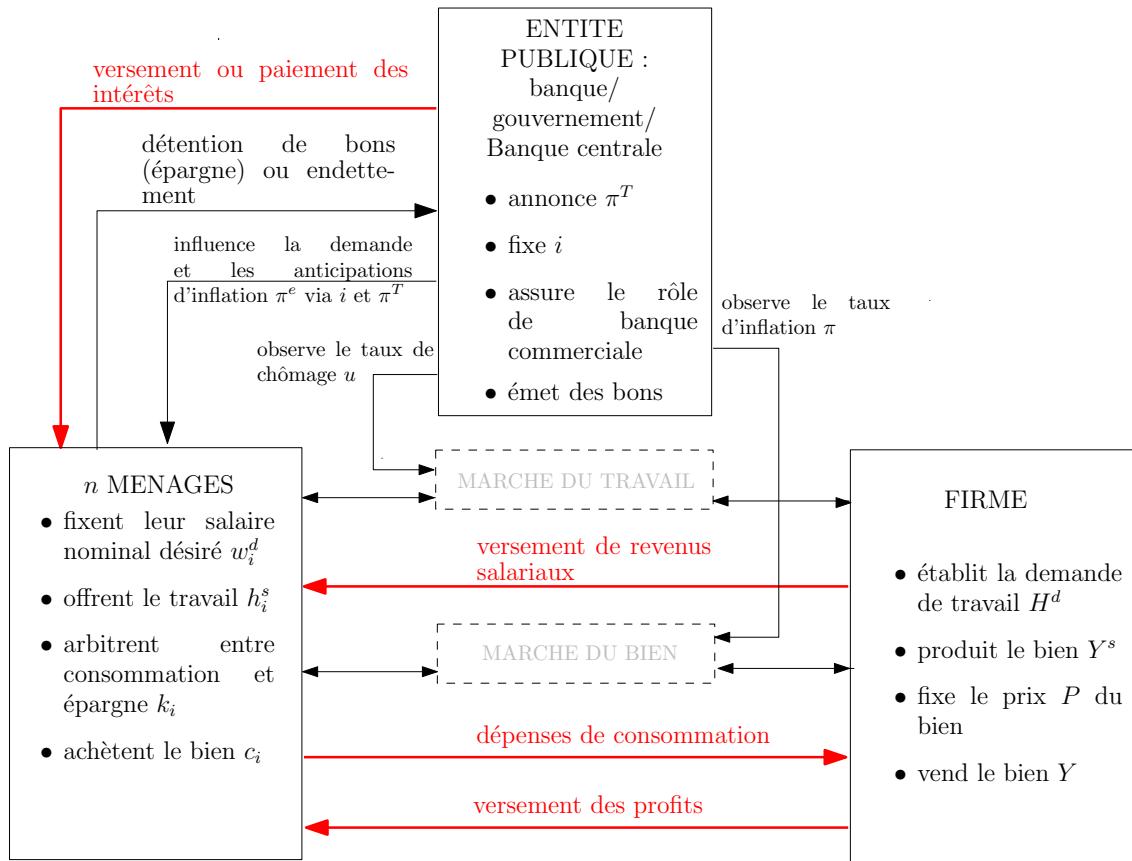


FIGURE 2.3 – Fonctionnement global du modèle – les flux financiers sont représentés en rouge.

de cette hypothèse dans notre modèle.

Comme mentionné plus haut dans ce chapitre, les agents de notre modèle sont supposés être dotés de *rationalité limitée* : ils ne sont pas capables de comprendre tout le fonctionnement de l'économie dans laquelle ils évoluent, encore moins de résoudre des programmes d'optimisation intertemporelle en utilisant le modèle à cette fin. Dans ce modèle, les comportements macroéconomiques sont produits par les interactions locales au niveau microéconomique. Un tel contexte est caractérisé par une *incertitude radicale*, dans lequel il n'est pas possible de prévoir la trajectoire future des variables en s'appuyant sur des lois de probabilité prédéfinies. De plus, l'information de chaque agent est seulement locale et ils ne sont pas conscients des caractéristiques et des décisions des autres. En conséquence, nous ne pouvons décrire le comportement des agents de notre modèle en terme de maximisation intertemporelle de l'utilité et par les conditions du premier ordre qui en résultent. Les agents se reposent plutôt sur des règles simples, des *heuristiques* pour guider leur comportement vers la maximisation de leur utilité. En particulier, ils ne sont pas capables de répondre de manière optimale à l'arbitrage consommation/travail, qui donne lieu à un taux de salaire optimal sur le marché du travail (cf. équation (2.33)), ni de dériver un sentier optimal de consommation résultant en la condition d'Euler (équation

(2.29)). Ils ont recours à deux règles simples dans le but d'augmenter leur utilité. La première permet d'ajuster leur salaire nominal désiré, la seconde leur stratégie d'endettement ou d'épargne.

A chaque période  $t$ , chaque ménage  $i$  ajuste son salaire (nominal) désiré selon l'heuristique suivante :

$$w_{i,t} = w_{i,t-1} \times \left(1 + \mathbb{1}_{\pi_{i,t+1}^e > 0} \gamma_i^w \pi_{i,t+1}^e\right) \quad (2.63)$$

avec  $\gamma_i^w > 0$  le degré d'indexation du ménage  $i$  de son salaire nominal désiré sur l'inflation qu'il anticipe  $\pi_{i,t+1}^e$  (ces deux éléments sont déterminés plus bas), et la variable indicatrice  $\mathbb{1}_{\pi_{i,t+1}^e > 0}$  qui prend la valeur 1 si  $\pi_{i,t+1}^e > 0$  et 0 sinon.

L'heuristique (2.63) indique que le ménage augmente son salaire désiré seulement s'il anticipe un taux d'inflation positif. Dans ce cas, le salaire est augmenté de  $\gamma_i^w \pi_{i,t+1}^e$ , dans le cas contraire, il reste inchangé. Les salaires nominaux sont donc croissants par rapport à l'inflation anticipée et nous supposons qu'il y a une rigidité à la baisse des salaires nominaux. Ces hypothèses ont été empruntées entre autres aux travaux de Oeffner (2008) et Raberto et al. (2007, 2008). Dans les contributions de Raberto *et. al.*, c'est un syndicat qui fixe le taux de croissance du salaire nominal, en fonction notamment de la cible d'inflation de la banque centrale et les ménages ont des salaires de réserve. Ce n'est cependant qu'un élément implicite dans le modèle NK, dans la mesure où l'inflation et l'inflation anticipée y sont positivement corrélées. L'inclure explicitement dans notre modèle permet de créer un canal de transmission direct des anticipations d'inflation aux coûts de production, et par là à la dynamique des prix. Or, le canal des anticipations est un élément central de la macroéconomie NK (voir la discussion à ce sujet à la section II de ce chapitre et l'ouvrage de Woodford (2003b)). *L'équation (2.63) représente ainsi le canal des anticipations de la politique monétaire.* Nous revenons en détails sur ce point à la sous-section III.5.

Etant donné l'heuristique (2.63), *le coefficient  $\gamma_i^w > 0$  est la première stratégie du ménage.* Il fait face à un arbitrage en l'établissant : soit il choisit un coefficient  $\gamma_i^w$  élevé (typiquement supérieur à un) pour augmenter son salaire réel anticipé mais court le risque d'être au chômage compte tenu de la façon dont le marché du travail alloue offres et demandes de travail (cf. sous-section III.4) ; soit il choisit un coefficient  $\gamma_i^w$  plus faible (typiquement inférieur à un) pour augmenter ses chances d'être embauché mais prend le risque de subir une diminution de son salaire réel. Comme nous allons le démontrer dans la suite de l'analyse au chapitre 3, cet arbitrage est influencé par la conjoncture économique dans laquelle le ménage prend ses décisions, notamment le taux de chômage et le taux d'inflation.

### **Encadré 2.2 – Choix des algorithmes génétiques et justification des restrictions sur l'offre de travail et le nombre de firmes**

Il n'existe pas de consensus sur la modélisation d'un processus d'apprentissage. Pour cette raison, sa spécification peut facilement paraître *ad-hoc*. Brenner (2006) propose plusieurs critères pour justifier le choix d'un modèle d'apprentissage :

- i) l'adéquation avec les travaux empiriques de l'économie expérimentale,
- ii) l'adéquation avec les connaissances issues des recherches en psychologie
- et iii) la simplicité du modèle retenu. A cet égard, il insiste sur le fait que le modèle le plus simple doit d'abord être mis en oeuvre et complexifié seulement si les résultats produits ne sont pas satisfaisants : c'est le *principe de parcimonie*.

Cependant, dans notre cas,

i) il n'existe pas, à notre connaissance, de travaux expérimentaux dont les conditions des expériences sont suffisamment proches de l'objet de l'apprentissage dans notre modèle pour permettre une comparaison. Nous savons seulement que les algorithmes génétiques apparaissent comme une représentation des mécanismes assez naturels d'expérimentation aléatoire et d'imitation au sein d'une population d'agents (voir notamment les travaux cités par Duffy (2006)).

De plus, ii) nous sommes davantage intéressés par la cohérence des comportements émergeant des interactions des agents plutôt que par le réalisme des détails de l'apprentissage modélisé. Se pose alors la question du degré d'abstraction du modèle d'apprentissage retenu : un modèle complexe et réaliste est-il préférable à un modèle simple et approximatif ?

iii) A cette question, nous retenons comme premier choix la simplicité du modèle. En effet, nous voulons obtenir un modèle minimal, que nous pourrons ensuite complexifier pour traiter notre question de recherche, en endogénisant les anticipations d'inflation notamment. Il nous apparaît préférable de garder le modèle minimal aussi simple que possible. Nous optons alors pour un algorithme génétique, qui agit au niveau de la population d'agents. En effet, l'algorithme peut agir au niveau de la population globale, chaque agent pouvant emprunter aux autres leurs stratégies, ou au niveau de chaque individu, chaque agent piochant dans son ensemble de stratégies évoluant par son propre algorithme génétique, sans interaction avec les stratégies des autres. Un algorithme au niveau de la population a l'avantage d'être plus parcimonieux dans la modélisation, impliquant entre autres moins de paramètres. Il convient aussi mieux au cas où les propriétés émergentes sont l'intérêt central du modèle, plutôt que le détail de l'apprentissage de chaque agent et bénéficie d'un meilleur support empirique et d'une utilisation plus fréquente en économie (Brenner (2006)).

Les premières versions du modèle conceptuel retenaient alors une population de  $m > 1$  firmes, qui révisaient leurs stratégies de demande de travail et de salaire offert et une population de  $n$  ménages qui révisaient leurs stratégies d'offre de travail et de demande de bien grâce à des algorithmes génétiques. En effet, le modèle NK comporte un grand nombre de firmes et ne fait aucune restriction sur la valeur de l'offre de travail de chaque ménage. Salle, Zumpe, Yıldızoglu & Sénégas (2012) montrent l'émergence d'*externalités d'apprentissage* à la fois du côté des firmes et des ménages dans une telle configuration de l'économie. Ces externalités avaient pour conséquence la stagnation de l'économie dans un sous-régime caractérisé par de très faibles volumes échangés à la fois sur le marché du travail et sur celui du bien.

L'intuition du mécanisme à l'oeuvre peut être exposée comme suit. Du côté des firmes, le coût marginal étant croissant et les prix fixés comme une marge sur ce coût, les firmes qui offraient de plus gros volumes de production proposaient les prix plus élevés. Or, les firmes étaient classées par ordre croissant de prix sur le marché du bien et les consommateurs par ordre décroissant de demande, dans le but de supposer un rationnement efficace. Les firmes avec des productions donc des prix élevés risquaient alors de n'être confrontées qu'à des consommateurs avec une demande faible, voire de ne pas pouvoir vendre leur production du tout si les firmes classées en premier avaient pu absorber toute la demande. Les invendus pesant fortement sur les profits, les firmes avec des stratégies de fortes demandes de travail obtenaient des profits plus faibles que les firmes qui produisaient de petits volumes mais écoulaient toute leur production. Cet effet se trouve accentué par le fait que le pouvoir d'achat distribué par une firme qui embauche beaucoup (donc paie de forts salaires) risque d'être dépensé auprès d'une autre firme avec une quantité de travail et un salaire proposé plus faible. Par conséquent, une stratégie de faible demande de travail se trouvait évolutionnairement stable.

Du côté des ménages, les stratégies étaient évaluées par l'utilité, croissante en la quantité de bien consommée et décroissante en la quantité de travail fournie. Si un consommateur décidait d'offrir une quantité de travail supérieure à celle des autres ménages, il souffrait d'une désutilité plus forte. Pour que la stratégie de forte offre de travail se diffuse, il faut que cette désutilité du travail soit plus que compensée par une plus forte consommation du bien de sorte que ce consommateur obtienne une utilité supérieure à celle des autres consommateurs. Or, rien ne garantit que ce sera le cas, les choix de la demande de bien et d'offre de travail étant déconnectés. Si un autre consommateur qui n'a pas travaillé mais qui dispose de revenus suffisants achète sa production, il obtient une utilité supérieure et une stratégie d'offre de travail nulle devient évolutionnairement stable.

Ainsi, la conjugaison de ces deux externalités produisait des résultats incohérents. Pour y remédier, deux solutions s'offraient à nous, i) complexifier l'apprentissage des agents, par exemple en appliquant un algorithme génétique au niveau individuel et non plus au niveau de la population (Vriend (2000)) ou ii) simplifier les mécanismes du modèle conceptuel. Toujours dans l'objectif de parcimonie que nous nous sommes fixé, nous optons pour la seconde option et retenons deux simplifications de notre modèle qui permettent de contourner ces externalités d'apprentissage. D'une part, pour mettre l'accent davantage sur le rôle de la politique monétaire sur le comportement de demande et les anticipations des agents, nous avons fait le choix de simplifier le côté offre de l'économie : nous supposons qu'il n'y a qu'une firme ( $m = 1$ ). Pour des raisons similaires, ce choix est aussi retenu dans les publications de Raberto et al. (2007, 2008). D'autre part, pour neutraliser l'externalité d'apprentissage du côté de l'offre de travail, nous avons normalisé à une unité l'offre de travail de chaque ménage. Cette normalisation s'interprète par exemple comme un emploi à temps plein légal. L'introduction d'une stratégie d'indexation du salaire désiré sur l'inflation anticipée garantit que les ménages conservent une variable décisionnelle sur le marché du travail. De plus, cette variable crée un canal d'influence par les anticipations pour la banque centrale. Par ailleurs, cette normalisation introduit un plafond de production potentielle et définit explicitement un indicateur de conjoncture économique : le taux de chômage ou l'écart de la production à la production potentielle. Cette hypothèse est également courante dans ce type de modèles (voir notamment Oeffner (2008), Gaffeo et al. (2008), Raberto et al. (2007, 2008), Mandel et al. (2010)). Le processus de validation du modèle mené au chapitre suivant démontre que ces restrictions permettent d'obtenir un modèle cohérent.

**Consommation** A chaque période, les ménages déterminent aussi la part de leur revenu  $k_{i,t}$  qu'ils souhaitent allouer à la consommation du bien. La demande (en terme réels) pour le bien de chaque ménage à chaque période est alors donnée par :

$$c_{i,t}^d = k_{i,t} \times \tilde{y}_{i,t} \quad (2.64)$$

où  $\tilde{y}_{i,t}$  correspond au revenu permanent du ménage tel que défini par Friedman (1957, chap. III) :

$$\tilde{y}_{i,t} = (1 - \rho) \frac{y_{i,t}}{P_t} + \rho \tilde{y}_{i,t-1} = (1 - \rho) \sum_{l=0}^t \rho^{t-l} \frac{y_{i,l}}{P_l} \quad (2.65)$$

avec  $\rho \in [0, 1[$ ,  $P_t$  le niveau général des prix en  $t$ <sup>15</sup> et  $y_{i,t}$  le flux de revenus (nominaux) que le ménage  $i$  perçoit chaque période :

$$y_{i,t} = w_{i,t} h_{i,t} + \frac{\Pi_{t-1}}{n} + b_{i,t-1}(1 + i_{t-1}) \quad (2.66)$$

Le revenu nominal  $y_{i,t}$  est composé de trois éléments :  $w_{i,t} h_{i,t}$  sont les revenus salariaux des ménages,  $\frac{\Pi_{t-1}}{n}$  est une part des profits réalisés dans l'économie à la période précédente par le secteur productif, dont chaque ménage est supposé détenir une part égale, et  $b_{i,t-1}$  représente les détentions nominales de l'agent (positives en cas d'épargne et négatives en cas d'endettement). Les ménages peuvent transférer de la richesse dans le temps grâce à des bons du trésor  $b$  à échéance une période. On suppose qu'il n'y a qu'un seul type de titre (sans risque) dans l'économie,  $i_t$  étant le taux d'intérêt nominal (sans risque) associé, fixé par la banque centrale (voir plus bas). Ainsi, si l'agent est créditeur en  $t - 1$ , i.e. si  $b_{i,t-1} > 0$ , il reçoit les intérêts et le principal à la période suivante  $t$ . Si l'agent est débiteur en  $t - 1$ , i.e.  $b_{i,t-1} < 0$ , il doit payer les intérêts et rembourser le principal en  $t$ . Enfin, le montant des détentions nominales désirées ou de l'endettement nominal désiré  $b^d$  est donné par<sup>16</sup> :

$$b_{i,t}^d = y_{i,t} - c_{i,t}^d P_t \quad (2.67)$$

Notons par ailleurs que chaque ménage dispose d'une richesse initiale  $b_{i,0} = \bar{b}_0$ ,  $\forall i$ .

Le fait que les agents détiennent à part égale le secteur productif et l'existence d'un unique actif sans risque à maturité une période sont des hypothèses du modèle NK. Remarquons néanmoins deux

15. A ce stade du modèle, cf. schéma 2.2, le niveau général des prix  $P$  est défini car il est dérivé des coûts de production, donc donné à l'issue du marché du travail. On ne suppose pas pour autant que ce prix est connu des ménages, il sert ici uniquement à définir analytiquement le revenu réel. Le prix étant unique, exprimer la demande en termes réel ou nominal n'influence pas l'allocation sur le marché des biens.

16. L'endettement ou l'épargne effectifs peuvent différer des niveaux désirés en cas de rationnement sur le marché du bien (le ménage épargne alors la richesse qu'il n'a pas pu dépenser) et de contraintes sur le niveau d'endettement (cf encadré 2.3, page 95).

différences vis-à-vis de ce modèle : les ménages ont une richesse initiale et les profits versés sont ceux de la période précédente et non de la période courante. Ces différences sont dues au caractère séquentiel des modèles à base d'agents, par opposition aux modèles analytiques dans lesquels les équilibres sur les marchés sont calculés simultanément : les ménages reçoivent alors simultanément les profits et les revenus salariaux (correspondant exactement aux coûts de production) et ces revenus couvrent parfaitement le coût d'achat de la production du bien. Dans notre modèle, chaque marché opère de manière séquentielle (voir schéma 2.2). A la période initiale ( $t = 0$ ), les agents ne disposent pas encore de profits ou d'intérêts sur de l'épargne et commencent par recevoir seulement leurs revenus salariaux. La demande de bien qui en résulte ne peut alors absorber l'offre à un prix supérieur au coût marginal. Donner aux ménages une richesse initiale permet de contourner cette difficulté. Notons aussi que la firme verse les salaires au début de chaque période comme une avance sur les recettes, acquises après la réalisation du marché du bien (cf. schéma 2.2) et n'a pas recours à un mécanisme de crédit. Par ailleurs, nous supposons qu'il n'y a qu'une seule entité publique qui joue le rôle de banque commerciale qui prête des liquidités aux ménages ou reçoit les dépôts des ménages en échange d'un taux d'intérêt, de gouvernement qui émet des bons du Trésor et de banque centrale qui fixe la politique monétaire. Cette simplification est très courante dans des contributions proches de la nôtre (Raberto et al. (2008), Oeffner (2008)). Cette distinction n'est pas non plus faite dans les modèles analytiques.

Le recours au revenu permanent nous permet de supposer que les ménages essaient de lisser leur consommation dans le temps, dans l'esprit de l'équation d'Euler qui détermine la loi d'évolution de la demande dans le modèle NK (cf. équation (2.29) et Woodford (2003b, chap. 2)). Si  $k_{i,t} < 1$ , le ménage épargne une partie de son revenu sous forme de bons pour consommer dans les périodes futures. Si  $k_{i,t} > 1$ , le ménage s'endette pour consommer davantage que son revenu. Un point apparaît important à souligner ici. Comme expliqué ci-dessus, le comportement des ménages dans notre modèle n'est pas exprimé comme une maximisation (intertemporelle) de l'utilité sous contrainte de budget, exprimée en termes de flux. Malgré cela, les ménages font face à une contrainte de budget en termes de flux, cette contrainte de budget s'imposant à eux période par période. En effet, dans le cas où  $y_{i,t} \leq 0$ , parce que les revenus de l'agent ne permettent pas de compenser soit les intérêts de sa dette, soit la distribution de profits négatifs, on impose  $c_{i,t}^d = 0$ . Ce revenu négatif est transféré à la période suivante sous forme de dette sur laquelle l'agent paie des intérêts et dont il doit rembourser le capital. De plus, la propension à consommer  $k$  est bornée, i.e. on impose  $k_{i,t} \in [\underline{k}, \bar{k}]$ . Le plafond  $\bar{k}$  permet d'éviter un endettement excessif de l'agent et le plancher  $\underline{k} > 0$  assure une consommation minimale de subsistance à chaque période. L'encadré 2.3 détaille les difficultés liées aux dynamiques explosives des détentions des agents et qui nous ont conduit à adopter ces hypothèses. En effet, le modèle NK

impose des contraintes sur ces variables (cf. équations (2.17) et (2.18)), dites de transversalité, qui sont conditionnées à la capacité de pouvoir poser *a priori* des contraintes à un horizon très lointain sur les variables du modèle. Dans un modèle à base d'agents, ce type de force *top-down* ne peut être introduit en tant que tel et nous devons imposer des contraintes période par période.

Tout comme dans le modèle NK, nous souhaitons modéliser le canal de la consommation de la politique monétaire, par lequel la demande évolue en fonction de l'écart entre le taux d'intérêt réel anticipé et son niveau naturel (voir section II). Chaque ménage ajuste donc à chaque période sa propension à consommer son revenu permanent suivant l'heuristique suivante :

$$k_{i,t} = k_{i,t-1} - \gamma_{i,t}^k (i_t - \pi_{i,t+1}^e - r_t^n) \quad (2.68)$$

avec le taux d'intérêt réel *ex ante* anticipé par le ménage  $i$ , donné par la relation de Fisher  $r_t^e \equiv i_t - \pi_{t+1}^e$ .

L'heuristique (2.68) est le pendant de l'équation d'Euler dans le modèle NK (cf. équation (2.49)) : dans les deux modèles, l'écart entre le taux réel *ex ante* et le taux naturel est le moteur de l'évolution de la demande. *A travers l'équation (2.68), nous modélisons le canal de la consommation de la politique monétaire.* Ce point est détaillé à la sous-section III.5. Etant donné l'heuristique (2.68), le coefficient  $\gamma_{i,t}^k$  est la seconde stratégie des ménages. Il traduit la manière dont les agents ajustent leur demande en fonction de l'écart entre le taux d'intérêt réel qu'ils anticipent et le taux dit naturel  $r_t^n$ .

En résumé, les stratégies des ménages sont constituées des coefficients  $\gamma^w$  et  $\gamma^k$ , qui décrivent les deux heuristiques (2.63) et (2.68), bases de leurs interactions sur le marché du travail et du bien. Ces deux heuristiques sont le pendant des conditions du premier ordre (2.29) et (2.33) dans le modèle NK.

### Encadré 2.3 – Traitement des dynamiques explosives de l'endettement et de l'épargne des ménages

Les premières versions du modèle ont révélé que l'endettement *en termes réels* des ménages pouvaient devenir explosif par le jeu des intérêts cumulés, tout comme l'épargne. Oeffner (2008) détaille des problèmes similaires dans son modèle. Cette situation doit être évitée pour que le modèle offre une représentation cohérente et réaliste d'une économie. En effet, si l'endettement en termes réels des consommateurs tend vers  $-\infty$ , ils sont collectivement plongés dans une situation de surendettement et l'économie "meurt", i.e. la consommation tend vers zéro. Dans le cas polaire, si les détentions en termes réels des agents tendent vers  $+\infty$ , leur contrainte budgétaire implicite disparaît et l'arbitrage consommations présente/future n'a plus aucun sens.

Dans les modèles DSGE – et dans le modèle NK en particulier – cet écueil est évité par hypothèse. D'une part, au niveau agrégé, la condition d'apurement des marchés  $C_t = Y_t, \forall t$  impose que l'épargne agrégée  $B_t$  soit nulle à chaque période. D'autre part, au niveau individuel, des contraintes appropriées sur la dynamique de la variable  $b_{i,t}$  (dite conditions de solvabilité ou de transversalité) excluent un processus qui tend vers  $+\infty$  – i.e. une explosion de l'épargne – ou vers  $-\infty$  – i.e. une explosion de l'endettement. Ces contraintes sont explicitées à la section II, équations (2.16), (2.17), (2.18) et (2.20).

Dans un modèle à base d'agents, ce type de contraintes analytiques *top-down* ne peut être posé *a priori* puisque nous ne pouvons nous projeter à un horizon infini, ou du moins très lointain. Il nous faut alors trouver des contraintes à chaque période.

En ce qui concerne la dynamique d'endettement, dans notre modèle, la borne  $\bar{k}$  assure que l'agent ne peut pas s'endetter au-delà de  $\bar{k} - 1\%$  de son revenu permanent. Cependant, si l'agent est rationné sur le marché du travail pendant les périodes suivantes ou si des profits négatifs sont distribués, on peut concevoir que l'agent endetté ne puisse pas rembourser le capital emprunté. Sa dette peut alors augmenter jusqu'au point où son revenu (et son revenu permanent) deviennent négatifs. Les intérêts cumulés plongent le ménage dans une situation de surendettement qui devient explosive. De plus, comme le ménage continue à fournir du travail au secteur productif en contrepartie d'un salaire sans pouvoir le dépenser, ceci crée une fuite de revenus dans le modèle et limite d'autant plus les débouchés du secteur productif. Des risques d'invendus pèsent alors sur les profits redistribués aux ménages à la période suivante. En réaction à cette baisse de la demande, le secteur productif est poussé à ajuster l'offre en diminuant la demande de travail. Le chômage augmente, ce qui contribue à limiter d'autant plus les revenus des ménages et ainsi la demande et à plonger d'autres ménages dans une situation de surendettement, etc.. Les premières simulations du modèle ont ainsi montré que des phénomènes de contagion des situations de surendettement parmi les ménages étaient possibles. Nous imposons donc aussi qu'à chaque période, lorsque la dette de l'agent dépasse 50% de son revenu permanent, il ne puisse pas emprunter davantage et épargne plutôt. Formellement, si  $\frac{b_{i,t}}{\tilde{y}_{i,t} \times P_t} < -0.5$ , avec  $\tilde{y}_{i,t} > 0$ , on impose  $k_{i,t} = k$ . Les phases de validation du modèle menée au chapitre 3 révèlent que ce dispositif est suffisant pour obtenir une économie viable.

Pour ce qui est de la dynamique de l'épargne, les premières versions du modèle étaient très souvent confrontées à une explosion des détentions en termes réels des ménages. Ce phénomène était en réalité une conséquence malheureuse des externalités d'apprentissage qui bloquaient à la fois l'offre et la demande de travail. Ces problèmes et les solutions apportées sont résumés dans l'encadré 2.2 et détaillés dans Salle, Zumpe, Yıldızoglu & Sénégas (2012). L'intuition est la suivante : l'offre de bien étant confinée à des niveaux très faibles, l'épargne résiduelle des agents augmentait de période en période de manière mécanique, faute de pouvoir être dépensée sur le marché du bien. Le jeu des intérêts cumulés accélérerait ce phénomène. De plus, les faibles volumes produits donnaient lieu à un prix agrégé faible, voire à une dynamique déflationniste. Dans ce cas, la valeur réelle de l'épargne des ménages tendait vers l'infini. La phase de validation du modèle présentée au chapitre suivant montre que ce phénomène a disparu.

**Apprentissage des ménages** Conformément au concept de rationalité limitée, les agents ont une connaissance et des capacités cognitives limitées. Ils se comportent donc de manière adaptative en réponse à l'évolution de leur environnement à travers un mécanisme d'apprentissage perpétuel (Orphanides & Williams (2005)). Nous retenons un mécanisme d'apprentissage social couplé à une exploration aléatoire de l'espace des stratégies. Ce mécanisme est modélisé par une forme élémentaire d'algorithme génétique. Ce choix est motivé dans l'encadré 2.2, page 90. Cette forme d'apprentissage est particulièrement bien adaptée pour représenter l'apprentissage au sein d'une population hétérogène d'agents avec une variété de comportements et qui tentent de s'adapter à un environnement complexe. En effet, il s'agit d'algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique mis en avant par Darwin (1859) (voir la contribution initiale de Holland (1975)). Le principe en est le suivant : l'évolution biologique procède en sélectionnant des génotypes, sur la base de l'adaptation relative à leur environnement des phénotypes qu'ils génèrent. La qualité de cette adaptation est mesurée par leur performances ou *fitness*. Les mieux adaptés ont une plus grande facilité à se reproduire et les erreurs de copies pendant la reproduction introduisent des nouveautés ou *mutations* au niveau des gènes. La sélection se fait continuellement sur la base de la performance relative des génotypes et conduit à une amélioration de l'adaptation de la population de génotypes à l'environnement et à une augmentation de la performance moyenne. Les formes d'algorithme génétiques retenues dans les modèles économiques reproduisent, de manière très schématique, ce principe d'évolution<sup>17</sup>. La popularité des algorithmes génétiques en économie s'explique par les avantages non négligeables de cette forme d'apprentissage. i) Ils sont simples à mettre en oeuvre et ne nécessitent que peu d'informations (typiquement l'espace de recherche des comportements et un critère de performance). Ils répondent ainsi au principe de parcimonie des modèles. ii) Ils sont robustes car ils ont la capacité de résoudre des problèmes non-linéaires complexes. Ils représentent alors de manière intuitive l'adaptation des comportements des agents dans un environnement économique appréhendé comme un système complexe adaptatif. iii) Ils procèdent par une approche itérative et heuristique, dans l'esprit de la rationalité limitée des agents au sens de Simon (1971).

Dans notre modèle, nous choisissons une version très simplifiée et très schématique des mécanismes de l'évolution en biologie. Nous retenons deux opérateurs d'apprentissage : i) la *sélection*, à travers sa forme la plus connue, à savoir la roulette-biaisée (*roulette-wheel*) : chaque stratégie est dupliquée dans la nouvelle population de stratégies proportionnellement à sa performance et ii) la *mutation*, qui procède par modification aléatoire d'une stratégie d'un agent. L'opérateur *sélection* assure que les

17. Voir notamment Holland et al. (1989), Sargent (1993), Dawid (1999), Vallée & Yıldızoglu (2004) ou Brenner (2006) pour un traitement général de ces algorithmes. Ils sont appliqués à des modèles économiques par exemple dans les travaux de Arifovic (1995), Yıldızoglu (2002), Vallée & Yıldızoglu (2009).

comportements qui apportent une meilleure performance que la performance moyenne sont adoptés et l'opérateur `mutation` permet d'assurer la propriété d'ergodicité du processus d'apprentissage, i.e. il assure que tous les points de l'espace de recherche des stratégies peuvent être atteints. Ainsi, si de bonnes stratégies ne se trouvent pas dans la population initiale de stratégies, elles peuvent quand même être testées et se diffuser dans la population. La mutation doit cependant intervenir à la marge pour ne pas trop perturber le système à chaque période.

Le critère de performance des stratégies des ménages est donné par une forme lissée de leur utilité :

$$\tilde{u}_{i,t} = (1 - \rho)u_{i,t} + \rho\tilde{u}_{i,t-1} = (1 - \rho)\sum_{l=0}^t \rho^{t-l}u_{i,l} \quad (2.69)$$

avec  $u(c_{i,t}) \equiv \ln(c_{i,t})$ ,  $\forall i$ <sup>18</sup>. Ceci revient à considérer une élasticité de substitution intertemporelle de la consommation égale à 1 (cf. équation (2.2)). Notons que, dans le modèle NK, la fonction d'utilité est également une fonction décroissante de la quantité de travail offerte par les ménages mais ici, l'offre de travail est contrainte (cf. équation (2.62)). Ce n'est donc pas à proprement parler une stratégie des ménages, dans le sens où ils ne peuvent pas agir dessus pour augmenter leur utilité. C'est pourquoi nous n'incluons pas le travail dans la fonction d'utilité des ménages. Ce choix est aussi retenu dans la contribution de Mandel et al. (2010). L'encadré 2.2, page 90 documente davantage ce point. Cependant, la spécification particulière de la fonction d'utilité n'affecte pas la dynamique du modèle, pourvu qu'elle soit continue, croissante et concave en  $c$ , ce qui est le cas ici, dans la mesure où elle ne sert que de manière ordinaire, pour classer les performances des ménages dans le processus d'apprentissage social (voir ci-après). Par ailleurs, nous retenons, non pas l'utilité présente (sauf dans le cas où  $\rho = 0$ ) mais une moyenne mobile des utilités passées des agents comme critère de performance. Ceci nous permet d'évaluer le comportement des agents de manière continue et non sur la base d'un succès ponctuel. Ainsi, les bonnes stratégies sont celles qui produisent *de manière durable* une utilité plus élevée.

Les ménages ont donc chacun un couple de stratégies  $\gamma^w$  et  $\gamma^k$  qu'ils révisent selon le mécanisme d'apprentissage que l'on vient de discuter. Formellement, ce mécanisme est mis en place de la manière suivante. A chaque période, soit :

avec une probabilité  $P_{imit}$  un ménage imite le couple de stratégies  $(\gamma^w, \gamma^k)$  d'un autre ménage.

Le processus d'imitation est régi par une sélection des stratégies à imiter type *roulette-wheel* : la probabilité que les stratégies d'un ménage  $i$  soient imitées est proportionnelle à la part de la performance de  $i$  dans la performance cumulée des  $n$  ménages. Chaque ménage  $i$  a donc la

---

18. La fonction  $\ln$  est tronquée pour pouvoir évaluer l'utilité retirée d'une consommation nulle : si  $c_{i,t} \leq 0.0001$ ,  $u(c_{i,t}) = -9$  (on a  $\ln(0.0001) \simeq -9.21$ ).

probabilité suivante d'être imité :

$$\frac{\exp(\tilde{u}_i)}{\sum_{l=1}^n \exp(\tilde{u}_l)}. \quad (2.70)$$

où la fonction exponentielle permet de prendre en compte les utilités négatives. Ainsi, les ménages tendent à imiter les stratégies qui mènent à de meilleures performances que la leur : plus l'utilité d'un ménage est élevée, plus son couple de stratégies a de chances d'être adopté par les autres.

**avec une probabilité**  $P_{mut}$  le ménage peut tirer aléatoirement un nouveau couple de stratégies  $(\gamma^w, \gamma^k)$ . La nouvelle stratégie  $\gamma^w$  est tirée aléatoirement d'une loi normale centrée sur la moyenne des stratégies  $\gamma^w$  des  $n$  ménages en  $t$  avec un écart-type donné, i.e.  $\mathcal{N}\left(\frac{\sum_{l=1}^n \gamma_{l,t}^w}{n}, \sigma_{mutW}\right)$ . Cette loi est tronquée : si le tirage est négatif, on fixe  $\gamma^w = 0.01$  pour éviter des coefficients d'indexation négatifs, dont l'interprétation serait difficile. De manière similaire, la nouvelle stratégie  $\gamma^k$  est tirée aléatoirement d'une loi normale centrée sur la moyenne des stratégies  $\gamma^k$  des  $n$  ménages en  $t$  avec un écart-type donné, i.e.  $\mathcal{N}\left(\frac{\sum_{l=1}^n \gamma_{l,t}^k}{n}, \sigma_{mutK}\right)$ . Ce tirage permet quant à lui des coefficients  $\gamma^k$  négatifs.

**avec une probabilité**  $1 - P_{init} - P_{mut}$  le ménage garde son couple de stratégies de la période précédente.

Notons que le modèle de Mandel et al. (2010) retient un mécanisme d'apprentissage identique au nôtre, à la différence que l'indexation des salaires est une variable décisionnelle des firmes.

**Paramètres** Pour conclure, les paramètres régissant le comportement des ménages sont donc  $n > 0$ ,  $\bar{b}_0 \geq 0$ ,  $\rho \in [0, 1[$ ,  $\underline{k} \in [0, 1]$ ,  $\bar{k} \geq 1$ ,  $P_{init} \in ]0, 1]$ ,  $P_{mut} \in ]0, 1]$ ,  $\sigma_{mutK} > 0$  et  $\sigma_{mutW} > 0$ .

### III.2 Comportement de la firme

Nous résumons le côté offre de l'économie par un monopole. Ce choix a été fait durant les phases de validation du modèle pour obtenir un modèle cohérent (voir encadré 2.2, page 90 pour une explication détaillée). Cette simplification n'apparaît pas fondamentale dans la mesure où, tout comme le modèle NK, nous nous intéressons à la manière dont la politique monétaire influence la consommation et ainsi le produit, puisqu'il est déterminé par la demande.

Cependant, nous ne pouvons pas recourir à l'optimum standard du monopole pour décrire le comportement de la firme. En effet, comme expliqué précédemment, les agents du modèle n'ont qu'une information locale et les dynamiques agrégées résultent de leurs interactions locales. La firme ne peut donc pas mécaniquement répondre à la demande à laquelle elle fait face, comme il est postulé dans le

modèle NK car elle ne la connaît pas : elle n'est pas capable de connaître précisément les demandes individuelles de chaque ménage (2.64).

Supposons d'abord que la firme puisse embaucher  $H$  unités de travail (voir plus bas comment cette embauche est mise en place). Elle produit alors un seul bien, périssable, avec la fonction de production usuelle (voir par exemple Gali (2008)) :

$$Y_t^s = A_t H_t^{1-\alpha} \quad (2.71)$$

avec  $\alpha \in [0, 1[$  entraînant des rendements décroissants (constants si  $\alpha = 0$ ) et  $A_t$  un facteur technologique. La fonction de production (2.71) n'inclut qu'un seul facteur de production, le travail, tout comme le modèle NK de base. La firme supporte donc des coûts de production égaux aux coûts salariaux :

$$\Psi(Y_t^s) = \sum_{i=1}^n h_{i,t} w_{i,t} \equiv H_t W_t \quad (2.72)$$

et son profit est donné par (en termes nominaux) :

$$\Pi_t = P_t Y_t - W_t H_t \quad (2.73)$$

avec  $P_t$  le prix de vente du bien, qui définit aussi le niveau général des prix dans l'économie puisqu'il n'y a qu'une seule firme et qu'un seul type de bien, et  $W_t$  le salaire nominal agrégé, défini comme la moyenne des salaires des agents, pondérée par la part de leur travail individuel dans le travail total  $H_t$ .

La firme procède en deux étapes (Walsh (2003b, Chap. 5)). D'abord, elle détermine un comportement de fixation du prix. Nous faisons l'hypothèse qu'elle agit comme un monopoleur et tarifie avec une marge  $\mu$  sur le coût marginal, traduisant son pouvoir de marché. Ce comportement correspond à celui d'un ensemble de firmes en concurrence monopolistique et en prix flexibles (voir sous-section II.2.1). Le coût marginal de la firme pour une quantité produite  $Y_t^s$  donnée vaut :

$$\frac{\partial \Psi(Y_t^s)}{\partial Y_t^s} = \frac{W_t}{(1-\alpha)} \frac{1}{A} \left( \frac{Y_t^s}{A_t} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (2.74)$$

qui est croissant dès que  $\alpha \neq 0$  et le prix correspondant :

$$P_t = \frac{(1+\mu)}{(1-\alpha)} \frac{W_t}{A_t} \left( \frac{Y_t^s}{A_t} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \quad (2.75)$$

est une fonction croissante de la quantité produite  $Y_t^s$  dès que  $\alpha > 0$ .

La firme doit ensuite déterminer la quantité de bien à offrir  $Y_t^s$ . Il se peut que la firme vende toute sa production  $Y^s$  mais la firme peut aussi fournir une offre excédentaire. Dans ce cas, la quantité  $Y$  effectivement vendue qui entre dans le calcul des profits (2.73) est inférieure à la quantité produite  $Y^s$  donnée par la technologie de production (2.71). Le bien étant supposé périssable, les invendus sont détruits et pèsent sur les profits. La firme doit donc fixer la quantité de bien à produire  $Y^s$  face à deux contraintes. D'une part, sur le marché du travail, la quantité de travail est limitée à  $n$  unités, la quantité de bien produite ne peut alors excéder  $A_t n^{1-\alpha}$  par (2.71). D'autre part, sur le marché du bien, elle peut faire face à des invendus.

**Apprentissage de la firme** Nous supposons que la firme exprime sa stratégie de production en termes de demande de travail  $H^d$ <sup>19</sup>. La firme guide elle aussi son comportement sur la base d'une heuristique qui lui permet d'ajuster graduellement sa stratégie de demande de travail avec pour objectif d'augmenter son profit.

Comme nous avons fait l'hypothèse d'une seule firme (cf. encadré 2.2, page 90), la firme ne peut bénéficier d'un apprentissage social et ne peut qu'apprendre par un mécanisme individuel. Nous considérons alors un simple mécanisme adaptatif, qui est une forme d'apprentissage lisse et graduelle, dans l'esprit de l'apprentissage par le gradient. Le profit étant croissant par rapport aux quantités vendues et décroissant par rapport aux quantités invendues (dès que  $\alpha \neq 0$ ), la firme augmente sa demande de travail dès que son profit en termes réels suit une tendance croissante et inversement, i.e. :

$$\boxed{\text{Si } \frac{\Pi_t}{P_t} \geq \tilde{\Pi}_t \text{ alors } H_{t+1}^d = H_t \times (1 + \varepsilon)}$$

et :

$$\boxed{\text{Si } \frac{\Pi_t}{P_t} < \tilde{\Pi}_t \text{ alors } H_{t+1}^d = H_t \times (1 - \varepsilon)} \quad (2.76)$$

avec  $\varepsilon > 0$  le paramètre de réactivité de la firme, assimilable à un taux d'apprentissage. Plus  $\varepsilon$  est faible, plus le processus d'apprentissage est lisse et inertiel. La moyenne du profit sur les dernières périodes est calculée de manière similaire à la performance des ménages :

$$\tilde{\Pi}_t = (1 - \rho) \frac{\Pi_t}{P_t} + \rho \tilde{\Pi}_{t-1} = (1 - \rho) \sum_{l=0}^t \rho^{t-l} \frac{\Pi_l}{P_l} \quad (2.77)$$

Cet algorithme itératif procède par améliorations successives et décrit de manière intuitive le processus

19. Ceci est équivalent à une stratégie en termes de quantités à produire  $Y^s$ , le travail étant le seul facteur de production et la technologie  $A$  étant exogène. De plus, le prix étant choisi comme une marge fixée sur les coûts, qui sont fonction des quantités, la firme n'a en fait qu'une seule variable de décision, que nous choisissons d'exprimer en termes de demande de travail.

de prise de décisions d'un agent doté d'une rationalité limitée (Leijonhufvud (2006, p. 1631-32)). Les modèles de Brunn (1997, 2007), Delli Gatti et al. (2005), Mandel et al. (2010) ou Lengnick (2011) ont également recours à une règle de décision très proche de l'équation (2.76).

Avant de passer à la fixation de la politique monétaire, soulignons un dernier point. Dans le modèle NK, les rigidités nominales, introduites pour permettre des effets réels de la politique monétaire à court terme, se portent sur l'ajustement des prix par les firmes, comme il a été montré à la sous-section II.2.2 ci-dessus. Nous choisissons d'introduire une rigidité nominale sur le marché du travail. Tout d'abord, les agents n'adoptent pas un comportement d'optimisation intertemporelle dans notre modèle à base d'agents. Le comportement d'apprentissage de la firme implique déjà qu'elle n'ajuste pas de manière optimale la quantité de bien offerte (et donc le prix) aux variations de la demande. La firme a au contraire un comportement adaptatif et inertiel (équations (2.76)). De plus, ajouter à la firme une contrainte supplémentaire à un problème déjà complexe ne répond pas au principe de parcimonie dont nous nous réclamons. Par ailleurs, l'équation (2.63) permet d'expliciter le canal de transmission direct des anticipations d'inflation au niveau des prix par les coûts salariaux. Enfin, la rigidité, essentiellement à la baisse, des salaires nominaux, semble trouver un support empirique moins contesté (voir par exemple Kahn (1997)) que les "coûts de menu" à la Calvo. Alvarez et al. (2006) montrent ainsi que ces rigidités sont plutôt dues à des problèmes de coordination entre les agents ou à l'existence de contrats implicites ou explicites régissant les transactions. La législation sur ces contrats, les usages du secteur, l'influence des syndicats, etc... sont autant d'éléments reconnus à l'origine de la rigidité des salaires nominaux à la baisse. L'important est que notre modèle incorpore une rigidité nominale dans l'ajustement du salaire réel. La phase de validation menée au chapitre suivant montre qu'une rigidité à la baisse sur les salaires nominaux permet de faire émerger des dynamiques cohérentes des variables agrégées.

**Paramètres** Soient  $\alpha \in [0, 1[$ ,  $\mu \geq 0$  et  $\varepsilon > 0$ .

### III.3 Comportement des autorités monétaires

La banque centrale fixe le taux d'intérêt nominal  $i$  avec un double objectif d'inflation et de plein-emploi. Le régime de ciblage de l'inflation est donc flexible, selon la terminologie de Svensson (1997a) : il implique un objectif d'activité économique à côté de l'objectif ciblé d'inflation. Nous retenons un objectif de chômage car cette variable est un indicateur naturel de la conjoncture économique dans notre modèle. Les travaux d'Orphanides & Williams (2007) ainsi que le modèle de Lengnick (2011) considèrent aussi une règle qui incorpore cette variable. Le taux d'intérêt nominal  $i_t$  est alors fixé par

une règle instrumentale non-linéaire de type règle de Taylor (1993) comme suit :

$$1 + i_t = (1 + r_t^n)(1 + \pi^T) \left( \frac{1 + \pi_t}{1 + \pi^T} \right)^{\phi_\pi} \left( \frac{1 + u^*}{1 + u_t} \right)^{\phi_u} \quad (2.78)$$

avec  $r_t^n$  le taux d'intérêt naturel,  $\pi^T$  la cible d'inflation et  $u^*$  le taux de chômage naturel. On suppose  $u^*$  nul et la banque centrale a un objectif de plein-emploi. Il n'y a en effet aucune justification dans ce modèle à ce que la banque centrale vise un taux de chômage strictement positif.  $\phi_\pi > 0$  et  $\phi_u > 0$  sont les coefficients de réaction respectifs à l'inflation et au taux de chômage. Notons que l'on retient l'expression non linéaire de la règle (voir par exemple Ashraf & Howitt (2012)), contrairement au modèle NK qui en retient une forme linéarisée. En effet, comme nous l'avons mentionné à la sous-section II.5, ce type de modèles fait l'hypothèse que seules des perturbations de faible ampleur peuvent frapper l'économie et les variables restent ainsi suffisamment proches de leurs valeurs d'équilibre pour que la version linéarisée du modèle reste valable. Au contraire, notre modèle est non-linéaire par nature et rien n'empêche *a priori* l'inflation de s'écarte très fortement de sa cible et le taux de chômage du taux de plein-emploi. La suite de l'analyse du modèle aux chapitres suivants montre ainsi que de telles situations se produisent.

**Paramètres** Soient  $\phi_\pi \geq 0$ ,  $\phi_u \geq 0$  et  $\pi^T \geq 0$ .

Le comportement des trois types d'agents – les ménages, la firme et les autorités monétaire – a été spécifié. Nous passons maintenant à la dérivation de la dynamique agrégée du modèle.

### III.4 Agrégation et rationnement des marchés

Comme explicité plus haut, la condition d'apurement des marchés ne peut être imposée comme une force *top-down* dans un modèle à base d'agents parce que les stratégies que les agents choisissent ne sont pas *a priori* compatibles entre elles. La dynamique agrégée émerge des interactions locales, il se peut que l'offre et la demande s'égalisent mais il se peut aussi qu'il y ait soit une offre soit une demande excédentaire. Les marchés sont donc régis par des mécanismes de rationnement.

**Marché du travail** Le marché du travail confronte la demande totale de travail dans l'économie  $H_t^d$  à l'offre de travail totale  $H_t^s = \sum_{i=1}^n h_{i,t}^s = n$  (voir équation (2.62)) à chaque période. Les ménages sont confrontés à la firme par ordre croissant de salaire désiré  $w_i$  : la firme commence par embaucher le ménage qui demande le salaire le moins élevé et embauche ensuite les ménages de plus en plus exigeants, jusqu'à ce que sa demande de travail soit satisfaite. Si la demande de travail permet de couvrir toute

l'offre, tous les ménages sont embauchés aux salaires désirés. Ce mécanisme de rationnement peut être justifié par le fait que la firme cherche à minimiser ses coûts de production (réciproquement à maximiser son profit) et dispose d'un pouvoir de marché dans la mesure où elle est un monopsonie sur le marché du travail. Ce processus détermine la quantité de travail effectivement embauchée

$$H_t = \min(H_t^d, n) = \sum_{i=1}^n h_{i,t} \quad (2.79)$$

et réciproquement, le taux de chômage  $u$  est donné par :

$$u_t = \frac{n - H_t}{n} \quad (2.80)$$

Le salaire réel se calcule comme  $\omega_t \equiv \frac{W_t}{P_t} = \frac{(1-\alpha)}{(1+\mu)} \cdot A_t \cdot H_t^{-\alpha}$ , qui est décroissant par rapport à  $H$  et atteint son minimum  $\frac{(1-\alpha)}{(1+\mu)} \cdot A_t \cdot n^{-\alpha}$  lorsque le plein-emploi est atteint.

**Marché du bien** L'offre agrégée de bien est déterminée par la quantité de travail effectivement embauchée par la firme  $H_t$  et est donnée par la fonction de production (2.71) :

$$Y_t^s = A_t H_t^{1-\alpha} \quad (2.81)$$

La demande agrégée pour le bien est donnée par :

$$C_t^d = \sum_{i=1}^n c_{i,t}^d \quad (2.82)$$

La firme vend d'abord aux ménages avec la demande la plus élevée au prix donné par l'équation (2.75). Il s'agit d'un mécanisme de rationnement dit efficace, cohérent avec l'hypothèse que les agents cherchent à maximiser leur utilité, dérivée de leur consommation (voir Benassy (1993)). De même, la quantité de bien échangée sur le marché du bien vaut :

$$C_t = \min(C_t^d, Y_t^s) \quad (2.83)$$

Si la production ne suffit pas à couvrir toute la demande, les ménages rationnés achètent des bons avec les liquidités restantes.

### III.5 Chocs et ajustements

Nous avons vu à la sous-section II.5 que la dynamique du modèle NK repose sur les mécanismes suivants : des rigidités nominales dans la fixation des prix éloignent le produit effectif du produit dit naturel, fonction de la structure du modèle (facteur technologique  $A_t$  et paramètres structurels  $\sigma$ ,  $\phi$  and  $\alpha$ ). A long terme, ce produit est constant puisque la technologie s'établit à un niveau constant. Ensuite, des chocs sont introduits. Ces chocs sont de deux types. D'une part des *chocs réels* perturbent l'économie en éloignant le produit naturel de son niveau d'état stationnaire. En retour, par la relation IS, ces chocs touchent l'écart de production puis l'inflation par la courbe de Phillips. D'autre part, des *chocs dits de prix* affectent directement l'inflation, de manière additive dans la courbe de Phillips. Notre modèle fonctionne différemment.

Tout d'abord, nous supposons un produit naturel déterministe et nous posons  $A_t = 1, \forall t$ . Cette valeur correspond à la valeur de long terme du facteur technologique retenue par Woodford (2003b, p. 225). En effet, introduire une croissance du facteur technologique revient, en l'absence de capital, à augmenter de manière purement exogène l'échelle de l'économie. Les premières versions de modèle incluaient cette caractéristique mais elle s'est révélée sans intérêt particulier pour les résultats qualitatifs du modèle. Par principe de parcimonie, nous choisissons de fixer la technologie et le produit naturel de notre modèle s'apparente à un *produit potentiel*, lorsque tout le travail est utilisé, i.e. en l'absence de chômage :  $Y_t^n = n^{1-\alpha}, \forall t$ . C'est cette situation que la banque centrale vise à travers la règle (III.3). Lorsque le plein-emploi est atteint, le salaire réel atteint un minimum  $\omega^n = \frac{(1-\alpha)}{(1+\mu)} \cdot n^{-\alpha}$ . Lorsque, de plus, toute la production est vendue, le profit réel de la firme atteint un maximum  $\Pi^n = \frac{(\alpha+\mu)}{(1+\mu)} \cdot n^{1-\alpha}$ .

Nous supposons aussi que le taux d'intérêt naturel est nul dans notre modèle, i.e.  $r_t^n = 0, \forall t$ . En effet, le taux naturel  $r_t^n$  est le taux d'intérêt réel qui prévaudrait dans une situation de prix parfaitement flexibles. Il a une composante constante, fonction de la préférence pour le présent des ménages et une part variable, qui traduit l'influence de chocs réels qui modifient le niveau de production naturel (cf. sous-section II.5). Dans notre modèle, de tels chocs sont absents et les ménages ne sont pas dotés de vision intertemporelle, dans le sens où ils se comportent de manière purement adaptative. On ne peut alors pas établir le pendant de leur taux d'escompte. En l'absence d'accumulation du capital, de croissance démographique et de préférence pour le présent explicite des ménages, il n'y a pas de justification théorique à un taux d'intérêt réel strictement positif à l'état stationnaire.

Ensuite, dans notre modèle, deux phénomènes peuvent éloigner l'inflation de la cible et le taux de chômage du taux de plein-emploi. D'une part, la rationalité limitée des agents les amène à s'engager dans un *processus d'apprentissage perpétuel*. Les travaux cités à la section IV du premier chapitre arrivent tous au résultat que, même lorsqu'il ne s'agit que d'une déviation modeste vis-à-vis du *bench-*

*mark* des anticipations rationnelles, cela provoque de la variabilité macroéconomique indépendamment des chocs introduits dans le modèle. Notre modèle s'éloigne fortement de ce *benchmark*, en postulant notamment que même les décisions microéconomiques des agents proviennent d'heuristiques. La variabilité macroéconomique émerge ainsi directement de ces comportements non-optimisateurs. De plus, nous avons vu que les modèles macroéconomiques à base d'agents cités dans l'introduction de ce chapitre partageaient la propriété de pouvoir faire émerger des cycles des affaires indépendamment de l'introduction de chocs réels (voir par exemple De Grauwe (2011)).

D'autre part, le processus d'apprentissage des ménages implique une part d'exploration aléatoire de l'espace des stratégies. Cette exploration est capturée par les paramètres  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$ . Plus ils sont forts, plus les stratégies des ménages sont susceptibles de s'éloigner, d'une période à l'autre, du comportement moyen de la population (cf. sous-section III.1). De plus, plus la probabilité de mutation  $P_{mut}$  est élevée, plus les stratégies des agents sont variables. Cet élément de l'apprentissage des agents introduit des perturbations que nous pouvons interpréter en termes de chocs. Nous ne pouvons pas à proprement parler de chocs d'offre et de chocs de demande, comme dans les modèles macroéconomiques Keynésiens, ni en termes de chocs réels et chocs de prix comme dans le modèle NK. En effet, le produit naturel de notre modèle est constant et ne peut être modifié par des chocs réels. Cependant, les chocs  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$  trouvent des interprétations économiques plutôt intuitives et les stratégies  $\gamma^k$  et  $\gamma^w$  affectent particulièrement les performances de la politique monétaire.

Tout comme le modèle NK de base, notre modèle inclut deux canaux de transmission de la politique monétaire : le *canal de la consommation* et le *canal des anticipations*. Une variation du taux d'intérêt nominal et du taux d'inflation anticipé influence directement la demande par l'équation d'ajustement du taux de consommation au taux d'intérêt réel anticipé (équation (2.68)), dans l'esprit de l'équation d'Euler (2.29) menant à la relation IS dans le modèle NK. Le taux d'inflation anticipé a également un effet sur le niveau du prix à travers les coûts de production (équation d'ajustement des salaires nominaux (2.63)), dans l'esprit de la nouvelle courbe de Phillips (2.61). L'apprentissage sur les coefficients ( $\gamma_{i,t}^w, \gamma_{i,t}^k$ ) permet de mettre directement en lien les canaux de transmission de la politique monétaire avec l'apprentissage des agents. En effet, les chocs  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$  ont un effet à la fois sur le canal de la consommation (par l'heuristique (2.68)) et sur le canal des anticipations (par l'heuristique (2.63)), et affectent donc les performances de la politique monétaire.

Pour montrer ce point, écrivons le taux d'inflation à partir de l'expression du niveau du prix (2.75) :

$$\pi_t \equiv \frac{\Delta P}{P_{t-1}} = \frac{\Delta \Psi}{\Psi_{t-1}} - (1 - \alpha) \frac{\Delta H}{H_{t-1}} \quad (2.84)$$

avec  $\frac{\Delta X}{X_{t-1}}$  le taux de croissance de la variable  $X$  entre les périodes  $t - 1$  et  $t$ . Grâce à l'équation (2.72),

on peut écrire

$$\Delta\Psi \equiv \sum_{i=1}^n w_{i,t-1} \Delta h_i + h_{i,t-1} \Delta w_i \quad (2.85)$$

et par l'équation (2.63), on a :

$$\Delta w_i = \mathbb{1}_{\pi_{i,t+1}^e > 0} (\gamma_{i,t}^w \pi_{i,t+1}^e w_{i,t-1}) \quad (2.86)$$

ce qui implique  $\Delta w_i \geq 0, \forall i, t$ . En réarrangeant les termes dans (2.75) et en utilisant l'égalité  $\Delta H \equiv \sum_{i=1}^n \Delta h_i$ , le taux d'inflation dans le modèle est donné par :

$$\boxed{\pi_t = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta w_i h_{i,t-1}}{\Psi_{t-1}} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{H_{t-1}} \left( \frac{w_{i,t-1}}{W_{t-1}} + \alpha - 1 \right)} \quad (2.87)$$

L'équation (2.87) correspond à la *courbe d'offre agrégée* du modèle à base d'agents. Tout comme dans le modèle NK, l'inflation a deux composantes. D'une part, l'inflation dépend positivement du taux de croissance des salaires nominaux ( $\Delta w_i$ ), lequel dépend positivement des anticipations d'inflation des agents  $\pi_{i,t+1}^e$  et de leurs stratégies d'indexation  $\gamma_{i,t}^w$  (cf. équation (2.86)). Les coefficients  $\gamma^w$  représentent la force des *effets dits de second-tour*, c'est-à-dire l'intensité par laquelle l'inflation anticipée se répercute effectivement dans les prix *via* les coûts salariaux. Ils passent par le canal des anticipations de la politique monétaire. Ainsi, l'apprentissage est directement lié à la dynamique de l'inflation.

D'autre part, l'inflation dépend positivement de la variation de l'emploi ( $\Delta h_i$ ). En effet, par le mécanisme de rationnement sur le marché du travail (cf. sous-section III.4), les ménages qui réclament de forts salaires sont ceux susceptibles d'être au chômage. En  $t-1$ , leurs salaires  $w_{i,t-1}$  sont alors supérieurs à la moyenne des salaires  $W_{t-1}$ . Pour ces ménages, nous avons donc  $\frac{w_{i,t-1}}{W_{t-1}} > 1 \geq 1 - \alpha$  (les rendements décroissants nous assurent que  $1 \geq 1 - \alpha$ ). À la période suivante, en  $t$ , si la demande de travail augmente, ces ménages sont ceux qui sont susceptibles d'être embauchés par la firme. Pour ces ménages, nous avons donc  $\Delta h_i > 0$ . Le raisonnement inverse est vrai si la demande de travail diminue. Ainsi, les variations de l'emploi et du niveau des prix sont positivement corrélées.

Si le plein-emploi est atteint, nous avons  $h_{i,t-1} = h_{i,t} = 1 \Rightarrow \Delta h_i = 0, \forall i, H_{t-1} = H_t = n \Rightarrow \Delta H = 0$  et  $\Psi_{t-1} = \sum_{i=1}^n w_{i,t-1}$ . En combinant ces éléments avec l'équation (2.86), le taux d'inflation s'écrit :

$$\pi_t = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_{i,t}^w \pi_{i,t+1}^e w_{i,t-1}}{\Psi_{t-1}} \quad (2.88)$$

Dans ce cas, la banque centrale a intérêt à ce que les anticipations d'inflation des ménages soient toutes égales à l'inflation anticipée i.e.  $\pi_{i,t+1}^e = \pi^T, \forall i$  et qu'ils adoptent en moyenne un comportement d'indexation égal à l'unité, i.e.  $\sum_i^n \gamma_{i,t}^w = n$ . En effet, ceci implique alors  $\pi_t = \pi^T$  et l'objectif d'inflation est

atteint. Si les chocs  $\sigma_{mutW}$  sont forts, les comportements d'indexation varient fortement et s'écartent brutalement de la moyenne des comportements d'indexation de la période précédente. Cette variabilité du salaire nominal agrégé provoque directement une variabilité dans le taux d'inflation. Le choc  $\sigma_{mutW}$  peut s'apparenter à un choc de prix, dans l'esprit du choc  $u$  introduit dans la courbe de Phillips (2.61). Il est intéressant à cet égard de remarquer que les chocs  $\sigma_{mutW}$  traduisent assez bien la proposition de Clarida et al. (1999, p. 1667) pour justifier les chocs  $u$  : des mouvements dans les salaires nominaux expliqués par des frictions dans le processus de fixation des contrats salariaux entre le secteur productif et les ménages.

Les chocs  $\sigma_{mutK}$  ont quant à eux un effet sur le canal de la consommation de la politique monétaire. En effet, par les équations (2.64) et (2.68), la consommation désirée de chaque ménage  $i$  est donnée par :

$$c_{i,t}^d = \left( k_{i,t-1} - \gamma_{i,t}^k (i_t - \pi_{i,t+1}^e - r_t^n) \right) \tilde{y}_{i,t} \quad (2.89)$$

Le taux d'intérêt nominal  $i_t$  fixé par la banque centrale a un effet immédiat sur la consommation du ménage  $i$  :

$$\frac{\partial c_{i,t}}{\partial r_{i,t+1}^e} = \frac{\partial k_{i,t}}{\partial r_{i,t+1}^e} \times \tilde{y}_{i,t} = -\gamma_{i,t}^k \tilde{y}_{i,t} \quad (2.90)$$

et un effet une période plus tard :

$$\frac{\partial c_{i,t+1}}{\partial r_{i,t+1}^e} = \frac{\partial k_{i,t+1}}{\partial r_{i,t+1}^e} \times \tilde{y}_{i,t+1} + k_{i,t+1} \times \frac{\partial \tilde{y}_{i,t+1}}{\partial r_{i,t+1}^e} \quad (2.91)$$

$$= -\gamma_{i,t}^k \tilde{y}_{i,t+1} + k_{i,t+1} (1 - \rho) \frac{b_{i,t}}{P_t} \quad (2.92)$$

où  $r_{i,t+1}^e \equiv i_t - \pi_{i,t+1}^e$  est le taux d'intérêt réel que le ménage  $i$  anticipe entre la période  $t$  et  $t + 1$ . Si le ménage  $i$  choisit  $\gamma_i^k > 0$ , sa consommation diminue lorsque le taux d'intérêt réel qu'il anticipe augmente : l'*effet de substitution* d'une variation du taux d'intérêt réel domine. C'est ainsi que se définit le canal de transmission de la politique monétaire à la demande (Walsh (2003c, p. 248)). Cependant, le ménage peut aussi opter pour un coefficient  $\gamma_i^k$  négatif. La demande augmente alors face à une hausse du taux d'intérêt réel qu'il anticipe et l'*effet revenu* domine. Le second terme de (2.91), qui est positif si  $b_{i,t} > 0$  et négatif sinon, représente l'effet richesse d'une variation du taux d'intérêt réel. Nous remarquons ainsi que l'efficacité du canal de transmission par la demande de la politique monétaire dépend complètement des stratégies  $\gamma_i^k$  des ménages : il faut que les coefficients  $\gamma_i^k$  soient globalement positifs pour qu'une hausse du taux d'intérêt nominal cause *in fine* une baisse de la demande agrégée. On remarque aussi que plus les coefficients  $\gamma_i^k$  sont élevés, plus la demande est sensible à une variation du taux d'intérêt et le canal de la consommation est plus efficace. De plus, si

les anticipations d'inflation des ménages sont coordonnées, de sorte que tous les ménages partagent la même anticipation d'inflation, les variations du taux d'intérêt nominal produisent des variations des taux d'intérêt réels anticipés dans une proportion semblable pour tous les ménages.

Les chocs  $\sigma_{mutK}$  ne peuvent s'apparenter à des chocs réels comme les chocs  $g$  du modèle NK (cf. équation (2.50)). Ils ne peuvent pas non plus s'apparenter à un choc de demande traditionnellement mobilisé dans les modèles Keynésiens d'offre et de demande globales. Il s'agit plutôt d'une *incertitude sur le canal de transmission réel* (i.e. hors anticipations) de la politique monétaire, ou d'une incertitude sur le modèle de l'économie.

Pour résumer, dans notre modèle, les autorités monétaires tentent de stabiliser l'inflation autour d'une cible et le taux de chômage autour de zéro dans un environnement marqué par i) un contexte global d'instabilité introduite par l'apprentissage perpétuel des agents, dans lequel ii) des chocs de prix *via* des effets de second-tour peuvent être plus ou moins forts et iii) le canal de transmission réel de la politique monétaire est plus ou moins incertain.

A ce stade, tout le modèle est spécifié, excepté le mécanisme de formation des anticipations d'inflation des ménages. On envisage deux schémas. Dans un premier temps, les anticipations sont fixées de manière exogène pour permettre la phase de validation du modèle, menée au chapitre suivant. Dans un second temps, une fois le modèle minimal validé, nous modélisons de manière explicite ce mécanisme et évaluons ainsi son influence sur la conduite de la politique monétaire et les performances macroéconomiques en résultant.

Une fois que nous avons établi les ingrédients du modèle conceptuel ainsi que les règles qui régissent son fonctionnement, nous devons programmer une économie artificielle qui répond à ces principes. L'annexe I donne le pseudo-code du modèle computationnel, c'est-à-dire une description concise et lisible du code informatique qui met en oeuvre le modèle. Le caractère très concis de ce code montre la simplicité du modèle conceptuel et répond parfaitement au principe de parcimonie que nous nous sommes fixé.

## Conclusion

Ce chapitre a permis de justifier notre démarche et les moyens utilisés pour la concrétiser. En particulier, à ce stade, nous espérons qu'il apparaît clairement :

- pourquoi nous choisissons de développer un modèle à base d'agent pour étudier les liens entre communication de la banque centrale (en particulier annonce de la cible d'inflation), anticipations des agents et performances macroéconomiques.
- comment un tel modèle se construit et par quelles méthodes nous pouvons ainsi légitimer ses hypothèses et apporter du crédit aux résultats obtenus par son biais.
- quelles sont les caractéristiques de notre modèle et comment il fonctionne en détail.

Concernant ce dernier point, l'essentiel de la dérivation du modèle NK et de notre modèle à base d'agents a consisté à démontrer les parallèles entre les deux cadres d'analyse et à en expliquer les divergences. Cette démarche a pour but de faciliter la compréhension de notre travail de thèse. Nous avons également pris soin de détailler dans l'annexe II qui suit les fondements et l'usage qui est fait dans la suite du travail de thèse des outils retenus pour l'analyse de notre modèle.

Conformément à la démarche d'obtention d'un modèle minimal que nous avons détaillée dans ce chapitre, le chapitre suivant procède d'abord à la validation du modèle conceptuel développé ici. Pour ce faire, nous laissons de côté la dynamique des anticipations pour nous focaliser sur les mécanismes émergents de la structure du modèle (en particulier résultant de la conjugaison de l'apprentissage, des mécanismes de rationnement et de l'intervention de la politique monétaire). Une fois que la phase de validation débouche sur l'obtention d'un modèle minimal, nous sommes en mesure d'assurer la fiabilité des résultats tirés de notre modèle et pouvons nous focaliser sur l'objet central d'analyse de la thèse, à savoir les interactions entre dynamique des anticipations privées, communication de la banque centrale et performances en matière de politique monétaire dans une économie structurée par l'apprentissage. Une analyse préliminaire de cette question conclut le chapitre 3, et nous permet d'évaluer les conséquences en termes de stabilisation macroéconomique de différents scenarii définis de manière exogène de désanclage des anticipations d'inflation privées. Une analyse approfondie de cette question est menée au chapitre 4, dans laquelle les anticipations sont endogénées et l'objet d'étude se concentre sur la manière dont la politique de communication de la banque centrale peut influencer la dynamique des anticipations, et en retour l'économie.



## CHAPITRE 3

# **Fonctionnement d'un Régime de Ciblage de l'Inflation dans une Economie sous Apprentissage**

---

## Sommaire

---

Introduction . . . . .	<b>113</b>
I Analyse préalable . . . . .	<b>115</b>
I.1 Paramétrage . . . . .	115
I.2 Description du phénomène de "spirale dépressive" de l'économie . . . . .	117
I.3 Mise en évidence des origines du phénomène de "spirale dépressive" . . . . .	120
I.4 Solution apportée au problème de "spirale dépressive" de l'économie . . . . .	128
II Analyse de sensibilité . . . . .	<b>130</b>
II.1 Caractérisation des variables-réponses . . . . .	131
II.2 Impact des facteurs sur les variables macroéconomiques du modèle . . . . .	139
II.3 Impact des paramètres sur les stratégies des ménages . . . . .	145
III Effets des anticipations sur la dynamique du modèle . . . . .	<b>150</b>
III.1 Protocole de simulation (configuration 3) . . . . .	151
III.2 Le cas de référence : une cible de l'inflation parfaitement claire et crédible	154
III.3 Conséquences d'une cible d'inflation bruitée . . . . .	159
III.4 Conséquences d'un manque de crédibilité de la cible d'inflation . . . . .	162
Conclusion . . . . .	<b>165</b>

---

## Introduction

LE CHAPITRE précédent a débouché sur l'obtention d'un modèle à base d'agents – un modèle conceptuel dans la terminologie de Klügl (2008) – pour l'analyse des liens entre apprentissage des agents, communication de la banque centrale et propriétés macroéconomiques des régimes de ciblage de l'inflation. Comme nous l'avons expliqué, pour que ce type de modèles soit opérationnel et permette de tirer des conclusions fiables quant à notre question de recherche, il doit être validé. Cette validation établit que le modèle construit est suffisamment pertinent *au regard de la question de recherche pour lequel il a été construit* (R. Sargent (2010)). Elle permet aussi de développer des intuitions sur les interdépendances entre les différents éléments du modèle et une compréhension plus fine de ses mécanismes, ce qui s'avère utile pour la suite de son utilisation.

La phase de validation entame alors naturellement ce présent chapitre, qui peut ensuite déboucher sur une première analyse des interactions entre les dynamiques des anticipations et d'apprentissage et les propriétés macroéconomiques émergentes.

Ainsi, les sections I et II (voir ci-après configurations (1) et (2) du modèle) sont consacrées à la validation du modèle, et établissent que les processus et résultats qui émergent du modèle sont plausibles et cohérents avec ce qui peut être attendu sur une base théorique ou en fonction des connaissances dont nous disposons du phénomène à l'étude. Le modèle doit faire émerger des comportements macroéconomiques cohérents à partir des interactions locales postulées entre d'une part les consommateurs et la firme et d'autre part, les consommateurs entre eux. La dynamique des anticipations est volontairement laissée de côté, en supposant les anticipations ancrées sur la cible d'inflation de la banque centrale, et nous nous concentrerons sur les mécanismes de la structure du modèle (mécanismes de marché et impact de l'initialisation des paramètres). Nous choisissons alors de ne pas ajouter à ce stade les effets du désancrage des anticipations des agents et de retenir la configuration la plus favorable d'un point de vue théorique à la politique monétaire, i.e. une situation où les anticipations sont égales à la cible. Dans ce contexte, nous testons particulièrement le bon fonctionnement des deux canaux de transmission de la politique monétaire, à savoir le canal de la consommation et celui des anticipations. Ici, l'introduction d'éléments évolutionnaires sert à déterminer des configurations de règles de comportement adaptées à un contexte particulier. A cet égard, nous avons précédemment justifié le choix des algorithmes génétiques pour modéliser l'apprentissage des ménages (cf. encadré 2.2, page 90). Dans la phase de validation, nous ne nous intéressons alors qu'aux résultats qu'ils amènent et non au réalisme des mécanismes d'apprentissage eux-mêmes.

Par ailleurs, l'analyse de sensibilité nous permet d'identifier les domaines de variation admissibles pour les paramètres du modèle, démarche qui s'est avérée particulièrement pertinente car nous avons

ainsi pu voir que certaines configurations de paramètres empêchent l’économie de se développer de manière quasi-systématique. Nous menons cette analyse grâce aux outils explicités à l’annexe II du chapitre précédent : méthode des plans d’expérience, estimation par kriging, outils d’exploration de données comme des arbres de régression et des boîtes à moustaches<sup>1</sup>. L’encadré 3.1, page 118 résume les relations clés du modèle pour aider à la compréhension de la discussion de ce chapitre.

Une fois que la cohérence interne du modèle est établie, nous obtenons un *modèle minimal*. Ce modèle est dit minimal car il doit inclure uniquement les éléments nécessaires à l’obtention d’un modèle cohérent pour la question de recherche envisagée.

La section III entre alors dans le cœur de l’analyse de notre question de recherche (ci-après la configuration (3) du modèle). Cette section expose une première analyse par le biais de la spécification de différents scenarii d’anticipations d’inflation. Nous spécifions de manière exogène ces différents scenarii dans le but de créer différentes configurations du point de vue de la politique de communication de la banque centrale, et d’en apprécier les conséquences sur la dynamique d’apprentissage des agents et les performances macroéconomiques associées. Dans cette première analyse, nous ne retenons que la communication sur la cible d’inflation<sup>2</sup>. Deux dimensions de la communication sur la cible d’inflation sont cruciales pour l’ancrage des anticipations sur la cible : la précision de l’annonce et sa crédibilité. Ainsi, les différents scenarii que nous envisageons permettent différents degrés de crédibilité, incluant les cas limites d’une crédibilité parfaite et d’une crédibilité nulle, ainsi que différentes formes de bruit (public ou privé) dans la transmission de la cible aux ménages.

Nous obtenons trois résultats principaux qui s’inscrivent de manière intéressante dans la littérature existante, empirique et surtout théorique. Premièrement, lorsque les anticipations sont bien ancrées sur la cible d’inflation des autorités monétaires, la conduite de la politique monétaire permet d’isoler fortement l’économie des chocs issus de l’apprentissage. En particulier, le principe de Taylor n’apparaît pas comme discriminant, bien que des réactions agressives aux deux objectifs semblent mieux stabiliser l’économie. Ce résultat montre l’importance primordiale de la crédibilité de la cible dans les performances de la banque centrale en matière de stabilisation macroéconomique.

Deuxièmement, et en conséquence, une crédibilité imparfaite produit des anticipations en partie guidées par l’inflation effective et ainsi désancrees de l’objectif des autorités monétaires, ce qui entrave la capacité de la banque centrale à réagir aux chocs affectant l’économie et crée un arbitrage entre ses deux objectifs.

Troisièmement, le bruit dans la communication de la cible crée soit un manque de coordination

---

1. Voir Frey & Patil (2002) pour une revue comparative des différentes méthodes d’analyse de sensibilité.

2. Une politique de transparence plus étendue, incluant notamment les projections de la banque centrale est traitée au chapitre 4.

entre les agents et ainsi une dispersion des anticipations, soit un manque de coordination des agents avec la banque centrale, les anticipations privées se trouvant ancrées à un point divergeant de la cible. Ces deux situations donnent lieu à des comportements des agents plus hétérogènes. En conséquence, ceci crée de l'instabilité macroéconomique et restreint l'action de la politique monétaire sur l'inflation et le chômage, en particulier dans la seconde situation. Ce résultat est particulièrement important car il montre clairement le rôle potentiel de l'hétérogénéité dans la modification de nos conclusions théoriques.

Nous nous tournons d'abord vers les résultats issus du processus de validation du modèle.

## I Analyse préalable

Une fois le modèle programmé, une des premières questions qui se pose est celle de l'initialisation des paramètres et des stratégies des agents. En effet, les domaines de définition des paramètres sont plutôt larges (voir le tableau 3.1, première colonne) et rien ne justifie *a priori* d'exclure certaines valeurs. Nous avons alors dû mener l'analyse de sensibilité du modèle en deux temps. Les premières tentatives d'analyse du modèle ont été conduites sur des domaines de variation volontairement larges des paramètres (voir le tableau 3.1, troisième colonne). Dans ce cas, le modèle converge fréquemment vers une situation où la production et l'emploi sont nuls ou quasi-nuls, l'économie n'est pas viable. Nous qualifions ce phénomène de "spirale dépressive". Il convient alors d'identifier l'origine du problème et d'y remédier. Pour repérer et exclure de la suite de l'analyse les configurations de paramètres qui en sont responsables, nous estimons la probabilité de viabilité de l'économie grâce à un modèle *probit* et affinons sur cette base les domaines de variation des paramètres. Cette section détaille la démarche adoptée et justifie les restrictions choisies sur le domaine de variation des paramètres. Grâce à cette analyse préalable, nous obtenons un échantillon de l'espace des paramètres correct en vue de réaliser l'analyse de sensibilité du modèle.

### I.1 Paramétrage

Le tableau 3.1 détaille les paramètres et leur ensemble de définition (première colonne) ainsi que le domaine de variation initialement testé (configuration (1), troisième colonne) et la configuration retenue pour l'analyse de sensibilité (configuration (2), quatrième colonne). La configuration (3) fixe les paramètres structurels pour se concentrer sur les effets des anticipations d'inflation et sera analysée à la section III.

Les domaines de variation initiaux sont larges pour ne pas imposer de restriction infondée. En

Paramètres	Nom dans R-Project	Domaines de variation			Description
		config. (1)	config. (2)	config. (3)	
Paramètres structurels de l’économie					
$\alpha \in [0, 1[$	alpha	[0, 0.5]	[0, 0.4]	0.25	paramètre de rendements d’échelle ( $\alpha = 0 \Leftrightarrow$ rendements d’échelle constants )
$\mu \geq 0$	mu	[0, 1]	[0, 0.25]	0.10	marge appliquée sur le coût marginal
$\varepsilon > 0$	epsilon	[0.01, 0.2]	[0.01, 0.04]	0.01	taux d’ajustement de la demande de travail
$\rho \in [0, 1[$	rho	[0, 0.9]	[0, 0.9]	{0, 0.45, 0.9}	degré de lissage des moyennes mobiles ( $\rho = 0 \Leftrightarrow$ pas de lissage )
$b_0 \geq 0$	initWealth	[1, 10]	[5, 10]	10	richesse initiale de chaque ménage
Paramètres de l’apprentissage des agents					
$P_{imit} \in ]0, 1]$	probImit	[0.01, 0.25]	[0.01, 0.2]	{0.05, 0.1, 0.1}	probabilité d’imitation de l’algorithme génétique
$P_{mut} \in ]0, 1]$	probMut	[0.01, 0.1]	[0.01, 0.1]	{0.01, 0.05, 0.1}	probabilité de mutation de l’algorithme génétique
$\sigma_{mutK} > 0$	mutSpaceK	[0.01, 0.5]	[0.01, 0.5]	[0.05, 0.4]	pas des mutations, i.e. espace de tirage des stratégies $\gamma_K$
$\sigma_{mutW} > 0$	mutSpaceW	[0.01, 0.5]	[0.01, 0.5]	[0.05, 0.4]	pas des mutations, i.e. espace de tirage des stratégies $\gamma_W$
Paramètres de la politique monétaire					
$\phi_\pi \geq 0$	coeffInfRate	[0, 2]	[0, 2]	[0, 2]	coefficient de réaction à l’écart d’inflation
$\phi_u \geq 0$	coeffUnemp	[0, 1]	[0, 1]	[0, 1]	coefficient de réaction au taux de chômage
$\pi^T \geq 0$	infTarget	[0, 0.05]	[0.01, 0.05]	0.02	cible d’inflation (égale à l’inflation anticipée)
Contraintes introduites sur le comportement des agents					
$k \geq 0$	minCRate	[0.1, 0.5]	[0.2, 0.5]	0.5	taux de consommation minimal du revenu permanent
$k \geq 1$	maxCRate	[1.1, 2]	[1.3, 2]	1.5	taux de consommation maximal du revenu permanent

Tableau 3.1 – Domaine de variation des facteurs (configuration (1) : analyse préalable en section I, configuration (2) : analyse de sensibilité en section II et configuration (3) : analyse de la dynamique des anticipations en section III)

particulier, dans la configuration (1) : la firme peut fixer une marge jusqu’à 100% de son coût marginal (paramètre  $\mu$ ) ; la firme peut ajuster jusqu’à 20% sa demande de travail en fonction de la différence entre son profit courant et la tendance de profits passés (paramètre  $\varepsilon$ ) ; les moyennes mobiles du revenu et de l’utilité des ménages ainsi que du profit de la firme peuvent être calculées de manière fortement inertielle, en prenant en compte les données jusqu’à une trentaine de périodes passées (paramètre  $\rho$ )<sup>3</sup>. De plus, le choix des domaines de variation des paramètres d’apprentissage permet de couvrir des configurations d’apprentissage fort aussi bien que faible. Les paramètres de politique monétaire permettent des préférences variées de la banque centrale. Les autres paramètres sont tirés dans des

3. En effet, le poids de la  $(t - n)^{ième}$  observation dans le calcul de la moyenne mobile en  $t$  vaut  $\rho^n$ . Ainsi, dans le cas limite où  $\rho = 0.9$ , l’observation en  $t - 30$  a encore un poids de  $0.9^{30} \simeq 4.2\%$  dans la moyenne mobile estimée en  $t$  alors que si  $\rho = 0.5$ , l’observation en  $t - 5$  ne pèse plus que  $0.5^5 \simeq 3.1\%$ .

domaines larges par rapport à leur ensemble de définition. Par exemple, les ménages peuvent s'endetter jusqu'à 100% de leur revenu permanent estimé (paramètre  $\bar{k}$ ) et peuvent en épargner jusqu'à 90% (paramètre  $k$ ).

On pose  $n = 500$ , i.e. l'économie est peuplée de 500 ménages. Le nombre d'agents est notamment limité par des contraintes de coût computationnel. Le tableau C.1 en annexe I donne le plan d'expérience utilisé. Il comporte 65 expériences, répliquées chacune 20 fois pour tenir compte du caractère aléatoire du modèle. Ainsi, on lance 1300 runs de 1000 périodes et les variables sont sauvegardées toutes les 50 périodes. On sauvegarde alors 26 000 périodes au total.

Chaque agent  $i$  tire son couple de stratégies initiales  $(\gamma_{i,0}^w, \gamma_{i,0}^k)$  dans l'espace  $[0.5, 1.5] \times [0, 1]$ . La demande initiale de travail de la firme est tirée aléatoirement dans  $[1, n]$ . On pose  $P_0 = 1$ , i.e. le prix  $P$  est initialisé à 1 et  $w_{i,0} = 1$  et  $k_{i,0} = 1$ ,  $\forall i$ , i.e. chaque ménage a un salaire désiré initial égal à 1 et un taux de consommation de son revenu permanent égal à 1.

On suppose enfin, comme souligné en introduction de ce chapitre, que les anticipations d'inflation des agents sont ancrées sur la cible annoncée par la banque centrale, i.e.  $\pi_{i,t+1}^e = \pi^T$ ,  $\forall i, t$ . Nous rappelons que cette simplification est imposée pour se focaliser sur le rôle des paramètres sur la dynamique du modèle, indépendamment de l'impact des anticipations des agents. Nous considérons alors le cas jugé le plus favorable pour la stabilisation de l'économie.

## I.2 Description du phénomène de "spirale dépressive" de l'économie

Une première analyse des simulations de la configuration (1) révèle que l'économie ne parvient fréquemment pas à se développer. En effet, 10 277 périodes sur les 26 000 sauvegardées, soit près de 40%, sont caractérisées par un taux de chômage supérieur à 90%. En ne retenant que la dernière période de chaque run (soit 1300 observations), on voit que l'économie a convergé vers une situation où le taux de chômage excède 90% dans 681 des 1300 runs (soit dans plus de la moitié des cas). La figure 3.1 décrit ce problème<sup>4</sup>. Par le comportement de marge sur le coût marginal croissant, le prix est croissant avec la quantité de travail embauchée (ou de manière équivalente avec la quantité de bien produite) dès que  $\alpha > 0$ . Ainsi, l'explosion du taux de chômage s'accompagne d'une déflation marquée, comme en témoigne la figure 3.3. Nous qualifions ce phénomène de "*spirale dépressive*"<sup>5</sup>.

---

4. Les étiquettes des variables représentées sur les graphiques sont explicitées dans le tableau 3.3, page 134.

5. Dans cette configuration, on a supposé que les anticipations d'inflation privées sont parfaitement ancrées sur la cible d'inflation, supposée positive ou nulle. Il ne s'agit alors pas d'une "*spirale déflationniste*" au sens où la déflation n'est pas auto-entretenue par des anticipations d'inflation négatives. La sous-section suivante I.3 détaillera les causes de ce phénomène.

**Encadré 3.1 – Résumé du fonctionnement du modèle (cf. section III du 2)**

*Comportements de chaque ménage  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$*

- Détermination des salaires nominaux :  $w_{i,t} = w_{i,t-1} \times \left(1 + \mathbb{1}_{\pi_{i,t+1}^e > 0} \gamma_{i,t}^w \pi_{i,t+1}^e\right)$   
avec  $\pi_{i,t+1}^e = \pi^T$  l’anticipation d’inflation (supposée égale à la cible dans les configurations (1) et (2)) et  $\gamma_i^d > 0$  la stratégie d’indexation.
- Détermination du taux de consommation :  $k_{i,t} = k_{i,t-1} - \gamma_i^k (i_t - \pi_{i,t+1}^e) \in [\underline{k}, \bar{k}]$ .  
taux appliqué au revenu permanent (calculé comme une moyenne mobile de paramètre de lissage  $\rho$  des revenus passés), avec  $i_t$  le taux d’intérêt nominal fixé par la banque centrale et  $\gamma_i^k$  la stratégie de réaction à ce taux d’intérêt

*Comportements de la firme*

- Fonction de production :  $Y_t^s = H_t^{1-\alpha}$   
avec  $H$  la quantité de travail embauchée et  $\alpha$  le paramètre de rendements d’échelle.
- Détermination du prix :  $P_t = \frac{(1+\mu)}{(1-\alpha)} W_t (Y_t^s)^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}$   
avec  $\mu$  le taux de marge sur le coût marginal,  $W$  le salaire nominal agrégé.
- Adaptation de la demande de travail :  
Si  $\frac{\Pi_t}{P_t} \geq \tilde{\Pi}_t$  alors  $H_{t+1}^d = H_t \times (1 + \varepsilon)$ , et  $H_{t+1}^d = H_t \times (1 - \varepsilon)$  sinon.  
avec  $\frac{P_t}{P_{t-1}}$  le taux de profit et  $\tilde{\Pi}_t$  sa tendance passée (de paramètre de lissage  $\rho$ ).

*Rationnement*

- Sur le marché du travail :  $H_t = \min(H_t^d, n)$  et  $u_t = \frac{n-H_t}{n}$  le taux de chômage.
- Sur le marché du bien :  $C_t = \min(C_t^d, Y_t^s)$  ( $C_t^d$  étant la demande agrégée).

*Politique monétaire*

- Règle de Taylor :  $1 + i_t = (1 + \pi^T) \left(\frac{1+\pi_t}{1+\pi^T}\right)^{\phi_\pi} \left(\frac{1}{1+u_t}\right)^{\phi_u}$   
 $\pi^T$  étant la cible d’inflation, et  $\phi_\pi$  et  $\phi_u$  les coefficients de réaction à l’écart d’inflation et au taux de chômage.

*Dynamiques*

- Volatilité de l’apprentissage :  $\sigma_{mutW}$  (proxy des chocs de prix/inflationnistes) et  $\sigma_{mutK}$  (mesure de l’incertitude sur le modèle de l’économie/le canal de transmission réel de la politique monétaire).
- Courbe d’offre agrégée :  $\pi_t = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta w_i h_{i,t-1}}{\Psi_{t-1}} + \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{H_{t-1}} \left(\frac{w_{i,t-1}}{W_{t-1}} + \alpha - 1\right)$
- Effet de substitution (canal de la consommation) :  $\frac{\partial c_{i,t}}{\partial r_{i,t+1}^e} = -\gamma_{i,t}^k \tilde{y}_{i,t}$   
si et seulement si  $\gamma^k > 0$ .

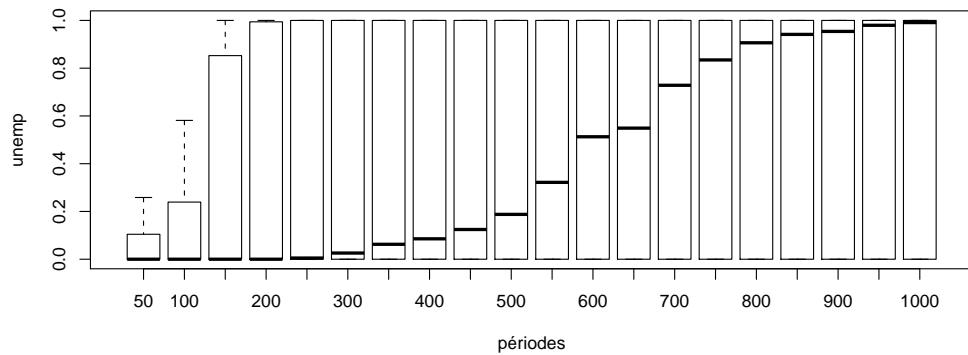


FIGURE 3.1 – Taux de chômage dans la configuration (1) – évolution par période

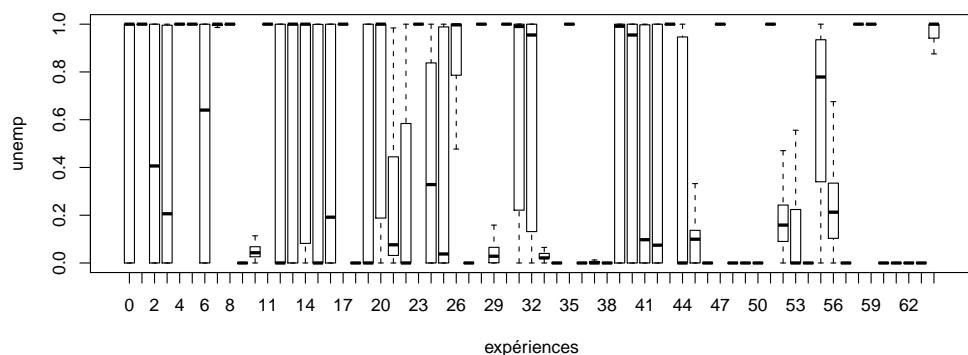


FIGURE 3.2 – Taux de chômage dans la configuration (1) – répartition par expérience

Notre modèle ne peut offrir une représentation cohérente d'une économie en vue de l'analyse de politiques monétaires si cette situation en est la principale caractéristique. Pour valider un modèle minimal, nous cherchons alors à identifier les causes de ce problème pour y remédier. La figure 3.2 montre la forte hétérogénéité des dynamiques des 65 expériences, suggérant le rôle déterminant des configurations de paramètres dans l'occurrence de la spirale dépressive. En effet, certaines expériences convergent clairement vers une spirale dépressive (c'est le cas des expériences regroupées sur la droite  $unemp = 1$ ), d'autres vers une situation de plein-emploi (regroupées sur la droite  $unemp = 0$ ) alors que d'autres connaissent une forte variabilité du chômage (mesurée par la largeur des "moustaches").

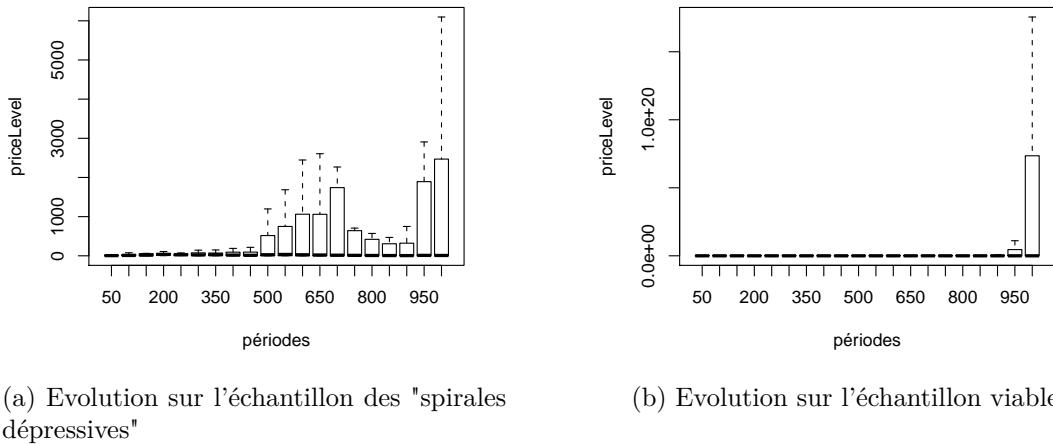


FIGURE 3.3 – Evolution du niveau général des prix dans la configuration (1)

### I.3 Mise en évidence des origines du phénomène de "spirale dépressive"

Sur l'ensemble des 1300 runs effectués, nous définissons une variable muette *sustEco* qui prend la valeur 1 lorsque le taux de chômage a convergé vers une valeur inférieure à 90%, autrement dit quand l'économie est considérée comme viable et 0 sinon<sup>6</sup>. Nous estimons ensuite un modèle *probit* où la variable dépendante est *sustEco* et les variables explicatives sont les 14 paramètres donnés dans le tableau 3.1, page 116.

Le tableau 3.2 présente les résultats de l'ajustement du modèle *probit*. Nous remarquons tout d'abord que le modèle est très significatif dans son ensemble, la probabilité critique associée au test du Chi-deux étant quasi-nulle (2e-105). De plus, les probabilités critiques associées aux paramètres nous montrent que 11 des 14 paramètres ont une influence très significative (à 1%) sur la probabilité de convergence du modèle vers une spirale dépressive (cinquième colonne). Le modèle a un pouvoir prédictif sur l'échantillon de près de 77%, ce qui apparaît très acceptable. Lorsque les effets estimés des coefficients sont positifs, une augmentation de ces coefficients favorise la convergence de l'économie vers une configuration viable (i.e. la variable *sustEco* se rapproche de 1) et inversement. La dernière colonne donne les effets marginaux des coefficients sur la probabilité de viabilité de l'économie, évalués à la

6. Face au problème de spirale dépressive, l'économie tend à 1000 périodes vers des taux de chômage proches voire égaux à 100%. Au sein des différents runs, la dynamique est clairement marquée : dans près de la totalité des cas, l'économie prend l'une des deux trajectoires, soit une spirale dépressive avec un taux de chômage avoisinant les 100%, soit un run dit "viable", où les taux de chômage se situent entre 0 et environ 30%. Nous adoptons alors 90% comme seuil de tolérance pour ne pas risquer d'exclure des cas non-viables, sans pour autant prendre le risque d'accepter des runs avec des taux de chômage irréalistes.

Ratio de Log-Vraisemblance : -632.5 (ddl=15) Prob[Chi-deux > value] = 2e-105					
	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z )	Marg. Effet
(Intercept)	0.5041	0.6406	0.79	0.4313	0.1024
$\alpha$	-1.6876	0.5260	-3.21	0.0013	-0.3428**
$\phi_\pi$	0.8961	0.1253	7.15	8.5e-13	0.182***
$\phi_u$	-2.2490	0.2414	-9.31	< 2e-16	-0.4568***
$\varepsilon$	-17.6654	1.6331	-10.82	< 2e-16	-3.5883***
$\pi^T$	14.8296	4.8584	3.05	0.0023	3.0122**
$\bar{b}_0$	0.2686	0.0318	8.44	< 2e-16	0.0546***
$\bar{k}$	0.9488	0.2721	3.49	0.0005	0.1927***
$\underline{k}$	2.8029	0.5775	4.85	1.2e-06	0.5693***
$\mu$	-2.1109	0.2553	-8.27	< 2e-16	-0.4288***
$\sigma_{mutW}$	0.5687	0.5189	1.10	0.2731	0.1155
$\sigma_{mutK}$	-0.7366	0.6369	-1.1565	0.1309	-0.1496
$P_{imit}$	-9.5367	1.1839	-8.06	7.9e-16	-1.9371***
$P_{mut}$	10.8454	2.8796	3.77	0.0002	2.2029***
$\rho$	-0.0254	0.2540	-0.10	0.9204	-0.0052
Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					
Taux d'erreur de prévision sur l'échantillon : 22.69%					

Tableau 3.2 – Rapport du modèle *probit* : variable dépendante = 1 si l'économie est viable

moyenne des variables explicatives. Par exemple, si  $\varepsilon$  passe de 0.05 à 0.06 (soit une variation de 0.01), alors que les autres paramètres sont fixés au milieu de leur domaine de variation ( $\alpha = 0.25$ , etc...), la probabilité que l'économie converge vers une spirale dépressive augmente de  $3.5883 \times 0.01 = 3.6$  points de pourcentage (sixième colonne du tableau).

Nous expliquons maintenant comment les paramètres significatifs agissent sur l'occurrence d'une spirale dépressive en trois points : i) certains paramètres jouent de manière *mécanique* sur l'ajustement de la demande de travail, qui converge alors vers zéro ( $\varepsilon$ ,  $\mu$  et  $\alpha$ ), ii) d'autres paramètres influencent la demande de bien ( $\bar{b}_0$ ,  $\bar{k}$  et  $\underline{k}$ ) et en particulier le pouvoir d'achat des ménages *via* la stratégie d'indexation du salaire nominal sur l'inflation ( $P_{imit}$ ,  $\pi^T$  et dans une moindre mesure  $P_{mut}$ ) et enfin iii) certaines configurations de la règle de la banque centrale entraînent une incapacité pour la politique monétaire à renverser la tendance vers une spirale dépressive ( $\phi_\pi$ ,  $\phi_u$  et dans une moindre mesure  $\pi^T$ ).

### I.3.1 Convergence de la demande de travail vers zéro

Tout d'abord, rappelons le mécanisme de révision de la demande de travail par la firme (voir équations (2.76), page 100 ou encadré 3.1, page 118) : lorsque le profit courant réel  $\Pi_t/P_t$  est au moins égal à la tendance de profit passé observée, la firme augmente sa demande de travail de  $\varepsilon\%$ , à moins

qu’elle n’embauche déjà toute l’offre de travail disponible. Dans ce cas, elle maintient sa demande de travail égale à l’intégralité de l’offre de travail, soit  $n$ . Au contraire, si le profit a baissé par rapport à la tendance passée, la firme diminue sa demande de travail de  $\varepsilon\%$ .

Analytiquement, par la fonction de production (2.71) et le comportement de marge sur le coût marginal, le prix fixé est donné par :

$$P_t = \frac{1+\mu}{1-\alpha} W_t H_t^\alpha \quad (3.1)$$

avec  $\alpha$  l’élasticité du prix vis-à-vis du travail embauché  $H$  et le profit en termes réels de la firme s’écrit :

$$\frac{\Pi_t}{P_t}(H_t) = Y_t - \omega H_t \quad (3.2)$$

où  $\omega \equiv \frac{1-\alpha}{1+\mu} H_t^{-\alpha}$  représente le salaire réel. En posant  $s_t \equiv Y_t^s - Y_t$  les invendus de la firme, on a :

$$\frac{\Pi_t}{P_t}(H_t) = \frac{\mu + \alpha}{1 + \mu} H_t^{1-\alpha} - s_t \quad (3.3)$$

On constate que, toute chose égale par ailleurs, le profit réel est décroissant par rapport aux invendus et croissant par rapport à la quantité produite (ou le travail embauché  $H$ ) lorsque la firme vend toute sa production. On peut calculer l’élasticité du profit vis-à-vis du travail embauché :

$$\varepsilon_{\frac{\Pi_t}{P_t}, H_t} = \frac{\frac{\mu + \alpha}{1 + \mu} (1 - \alpha) H_t^{1-\alpha}}{\frac{\mu + \alpha}{1 + \mu} H_t^{1-\alpha} - s_t} \quad (3.4)$$

Comme  $0 \leq \alpha < 1$ , le numérateur de (3.4) est nécessairement positif et le signe de l’élasticité correspond au signe du dénominateur. On a alors la condition pour que le profit chute face à une baisse de la quantité de travail embauchée :

$$\begin{aligned} & \frac{\mu + \alpha}{1 + \mu} H_t^{1-\alpha} - s_t > 0 \\ \Leftrightarrow & \frac{\mu + \alpha}{1 + \mu} Y_t^s > s_t \\ \Leftrightarrow & Y_t > \frac{1 - \alpha}{1 + \mu} Y_t^s \end{aligned} \quad (3.5)$$

Par définition,  $Y_t^s \geq Y_t, \forall t$ . Toute chose égale par ailleurs, on peut dire que : moins il y a d’invendus, plus la condition (3.5) est probable et dans le cas où la firme vend toute sa production (i.e.  $s_t = 0$ ), cette condition est toujours vérifiée et  $\varepsilon_{\frac{\Pi_t}{P_t}, H_t} = 1 - \alpha > 0$ ; plus  $\mu$  ou  $\alpha$  sont forts, plus cette condition est probable.

Par un effet cumulatif, le processus de révision de la demande de travail peut mener l’économie de manière mécanique vers une configuration où la demande de travail tend vers zéro. En effet, si

la firme fait face à une baisse de la demande en  $t$ , elle ne vend pas toute sa production et le profit chute par rapport à la tendance passée (le profit étant fonction décroissante des invendus, cf. équation 3.3). Ceci arrive parce que, comme il a été souligné à la sous-section III.2 du chapitre 2, la firme ne connaît pas la demande à laquelle elle sera confrontée à la période suivante lorsqu'elle ajuste sa demande de travail à la fin de chaque période, contrairement au modèle NK dans lequel les décisions de production et de consommation sont simultanées et l'offre s'adapte avec exactitude à la demande. Ainsi, si la demande baisse d'une période à l'autre, dans un premier temps, la firme fait face à des invendus. Voyant son profit diminuer, la firme révise alors à la baisse sa demande de travail donc sa production effective de bien pour  $t + 1$  (cf. équation (2.76)). L'ajustement entre l'offre et la demande de bien est ainsi séquentiel. Si le profit est croissant avec  $H$ , donc avec la taille de la production, i.e. si la condition (3.5) est vérifiée, le profit chute de nouveau à la période  $t + 2$ , entraînant une nouvelle révision à la baisse de la demande de travail en  $t + 3$  et donc du profit, etc... Cette situation entraîne une spirale dépressive qui conduit la demande de travail, donc la production vers zéro. C'est ainsi que nous constatons des runs dans lesquels le taux de chômage avoisine les 100% à l'issue des 1000 périodes.

Comme nous venons de l'identifier, cet effet sur la demande de travail dépend des trois paramètres  $\mu$ ,  $\varepsilon$  et  $\alpha$ , dont le modèle *probit* révèle une influence fortement significative sur l'occurrence de spirales dépressives. En effet, le paramètre  $\varepsilon$  est assimilable à un taux d'apprentissage et plus il est élevé, plus la firme diminue fortement sa demande de travail suite à une baisse constatée en  $t$  de son profit, donc plus la firme réduit fortement sa production de bien (équation (2.76)). Ainsi, si la condition (3.5) est vérifiée, i.e. si une chute de la quantité de travail  $H$  produit une chute du profit réel, ceci aura pour conséquence une nouvelle chute (d'autant plus forte) du profit en  $t + 1$  par rapport à la moyenne des profits observés sur les périodes précédentes. Cette nouvelle baisse entraîne alors une nouvelle (forte) révision à la baisse de la demande de travail et de la production en  $t + 2$ , etc...

Les paramètres  $\mu$  et  $\alpha$  ont aussi un impact déterminant sur le déclenchement de cet effet en chaîne : plus ces paramètres sont élevés, plus la condition (3.5) a de chances d'être vérifiée et plus le profit est sensible à une baisse de l'échelle de production. Enfin, rappelons que  $\alpha$  correspond à l'élasticité du prix de vente vis-à-vis du travail embauché par la firme (équation (3.1)) : plus  $\alpha$  est élevé, plus le coût marginal est croissant donc plus le prix diminue en réaction à une diminution de la quantité produite par la firme, accompagnant ainsi la spirale dépressive d'une déflation marquée.

### I.3.2 Chute de la demande de bien

L'occurrence d'une spirale dépressive peut également provenir de la demande de bien.

D'une part, la baisse de la demande de travail provoque une hausse du chômage et une diminution des revenus (salariaux) des ménages. Cet effet en retour accentue le mécanisme explicité ci-dessus : la demande de bien à la période suivante tend à diminuer, augmentant le risque d'invendus et de nouvelles chutes du profit. Ainsi, les paramètres qui soutiennent directement la demande des ménages limitent pour partie l'occurrence d'une spirale dépressive. Plus  $\underline{k}$  est élevé, i.e. moins les ménages ne peuvent épargner, plus  $\bar{k}$  est élevé, i.e. plus les ménages sont autorisés à s'endetter en proportion de leurs revenus et plus leur richesse initiale  $\bar{b}_0$  est importante, moins le modèle n'a de chances de converger vers une spirale dépressive.

D'autre part, les premiers tests de validation du modèle – notamment par représentations graphiques ou animations, cf. encadré 2.1, page 66 au chapitre 2 – ont révélé que le mécanisme de spirale dépressive peut provenir d'une diminution des salaires réels des ménages dès les premières périodes du modèle. Analytiquement, en reprenant l'équation de détermination du salaire nominal (2.63), page 89 et du niveau de prix (2.75), page 99 au chapitre précédent (redonnées à l'encadré 3.1, page 118), le taux de croissance du pouvoir d'achat de chaque ménage  $i$  s'écrit :

$$\frac{\Delta \omega_i}{\omega_i} \equiv \frac{\Delta w_i}{w_i} - \frac{\Delta P}{P} = (\gamma_i^w \times \pi_i^e) - \frac{\Delta W}{W} - \alpha \frac{\Delta H}{H} = (\gamma_i^w \times \pi^T) - \frac{\Delta W}{W} - \alpha \frac{\Delta H}{H} \quad \forall i \quad (3.6)$$

avec  $\frac{\Delta X}{X}$ , le taux de croissance de la variable  $X$  et l'inflation anticipée égale à la cible. Ainsi, si  $H$  augmente (i.e. si la production de bien augmente) ou si la cible d'inflation est faible et/ou le degré d'indexation de  $w_i$  sur celle-ci est relativement faible (typiquement  $\gamma_i^w$  inférieur à l'unité), le ménage  $i$  risque de s'appauvrir en termes réels. On voit encore que plus  $\alpha$  est fort, plus le salaire réel du ménage  $i$  peut diminuer face à une augmentation de la production. Rappelons que la demande de travail est initialisée en deçà de la quantité de travail disponible (égal à  $n$ ). Si la firme parvient à écouler sa production, elle dégage des profits positifs et est amenée à réviser à la hausse sa demande de travail. Elle produit davantage à un prix unitaire plus élevé (le coût marginal étant croissant avec la quantité produite dès que les rendements sont décroissants). La production suit alors une tendance croissante, entraînant un contexte inflationniste, i.e. le terme  $\alpha \frac{\Delta H}{H}$  de (3.6) est positif. Il faut que les ménages développent une stratégie d'indexation de leurs salaires nominaux désirés sur l'inflation anticipée assez forte pour pouvoir soutenir leur pouvoir d'achat et ainsi la tendance croissante du profit réel (équations (2.63) et (3.3)). Dans le cas contraire, l'augmentation des salaires nominaux ne compense pas l'inflation et la demande réelle pour le bien diminue, exposant la firme à des risques d'invendus et de chutes du profit. Elle diminue alors sa demande de travail et le mécanisme de spirale dépressive peut s'enclencher. C'est ainsi que les paramètres de l'apprentissage des ménages influencent l'occurrence de ce mécanisme. En particulier, un fort processus d'imitation semble entraver la diffusion

de stratégies d'indexation forte alors qu'une forte probabilité d'innovation semble l'encourager. Il est à noter cependant que l'ampleur du choc  $\sigma_{mutW}$ , qui correspond à l'espace de recherche de nouvelles stratégies  $\gamma^w$  ne semble pas significativement affecter la probabilité de viabilité de l'économie. Nous voyons aussi l'effet de la cible sur cette probabilité : plus la cible est élevée, plus le taux de croissance des salaires nominaux est fort pour un même coefficient d'indexation moyen et si la cible est nulle, les salaires nominaux restent constants (cf. équation 2.63). Ainsi, plus la cible est forte, moins l'économie n'a de chances de tomber dans une spirale déflationniste. C'est un des arguments qui expliquent pourquoi l'ensemble des banques centrales vise une cible d'inflation faible mais strictement positive. Ce point rejoint aussi l'argumentation sur les dangers d'adopter une cible d'inflation trop proche de zéro, rapportés dans la littérature macroéconomique, notamment celui associé au risque déflationniste (Blanchard et al. (2010)).

### I.3.3 Limites de l'action de la banque centrale

La règle de la banque centrale permet, dans une certaine mesure, de contrecarrer une spirale dépressive. En effet, celle-ci produit une situation comparable à ce que produirait un choc de demande négatif : l'inflation et le taux d'emploi sont simultanément en dessous de leurs cibles respectives ( $\pi^T \geq 0$  et 1). La banque centrale réagit alors en assouplissant la politique monétaire, i.e. en diminuant le taux d'intérêt nominal. Cette action devrait permettre d'augmenter la demande de bien et d'inverser la tendance à la dépression de l'économie, d'autant plus facilement que les anticipations d'inflation sont parfaitement ancrées sur la cible, comme souligné à la note de bas de page 5. En effet, dans cette configuration, la déflation n'est pas auto-entretenue par des anticipations d'inflation des ménages négatives, qui entraîneraient en retour une diminution de la demande *via* un taux d'intérêt réel *ex ante* positif (équation (2.68), page 94, redonnée à l'encadré 3.1, page 118). Au contraire, en diminuant  $i$  lorsque les anticipations sont ancrées sur la cible d'inflation, la banque centrale parvient à faire diminuer le taux d'intérêt réel *ex ante* exactement de la même ampleur. Cette action de la politique monétaire est aussi influencée par les bornes de la propension à consommer : plus elles permettent à la demande de varier (plus  $\bar{k}$  et  $\underline{k}$  sont élevés), plus la banque centrale a de marge de manœuvre pour favoriser la consommation en présence d'un choc de demande négatif.

Cependant, notre modèle reproduit une limite de la règle de taux d'intérêt particulièrement mise en valeur par la crise récente de 2007 : le plancher zéro du taux d'intérêt nominal<sup>7</sup>. Lorsque le choc de demande négatif est de trop forte ampleur, la banque centrale diminue le taux d'intérêt nominal et bute sur la contrainte de positivité de son instrument (voir la figure 3.4). Une fois le taux d'intérêt

7. Voir par exemple Walsh (2011) pour une discussion récente de ce problème. Oeffner (2008) pointe également la récurrence de ce problème dans le modèle macroéconomique à base d'agents qu'il développe.

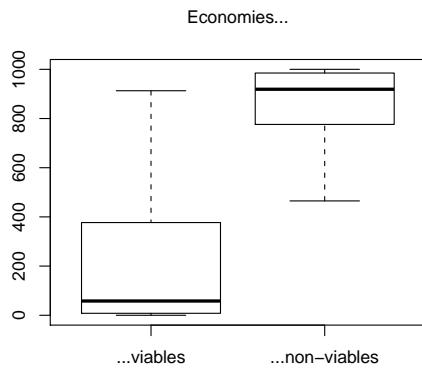


FIGURE 3.4 – Occurrence du plancher zéro du taux d’intérêt nominal sur les 1000 périodes dans la configuration (1)

nominal égal à zéro, si le choc de demande n’est pas contrecarré, la banque centrale n’a plus de marge de manœuvre pour agir sur l’économie par la règle de taux. Empiriquement, elle a recours à des politiques non-conventionnelles, en particulier des politiques quantitatives accommodantes (*quantitative easing*) mais ce type de politique est absent de notre modèle. Nous pouvons alors expliquer l’influence des coefficients de réaction de la règle et de la cible d’inflation sur la probabilité d’occurrence d’une spirale dépressive.

Comme le montrent les figures 3.5, face à un choc de demande négatif, plus le coefficient de réaction au taux de chômage  $\phi_u$  est faible, moins la règle de la banque centrale est exposée au problème du plancher zéro du taux d’intérêt nominal. De plus, si le coefficient de réaction au taux de chômage est faible, la banque centrale peut réagir plus fortement à l’inflation sans risquer d’atteindre le plancher zéro : elle dispose donc de davantage de marge de manœuvre pour contrecarrer le choc de demande. Rappelons que dans le contexte d’un choc de demande, les autorités monétaires ne font pas face à un arbitrage et réagir à l’inflation ou au chômage seul est suffisant pour orienter l’économie vers les objectifs de la banque centrale. Par ailleurs, dans un tel contexte, plus la cible d’inflation est élevée, moins le problème du plancher zéro est marqué. Ceci contribue aussi à expliquer le rôle positif de la cible d’inflation sur la probabilité de viabilité de l’économie. La contribution de Williams (2010) montre également comment une cible d’inflation faible accentue les effets du plancher zéro du taux d’intérêt lorsque les agents privés ont une connaissance imparfaite du modèle sous-jacent de l’économie et entraîne des phases de récession profondes. Dans notre modèle à base d’agents, même si les anticipations sont parfaitement ancrées sur l’objectif de la banque centrale, les agents ont une connaissance limitée et locale du fonctionnement de l’économie et une cible d’inflation faible produit des effets similaires.

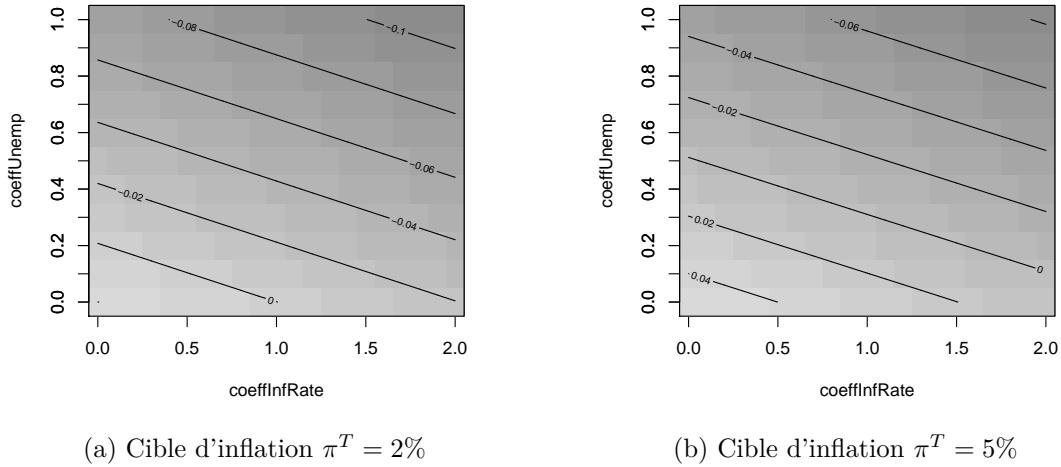


FIGURE 3.5 – Taux d'intérêt nominal en fonction des coefficients de réaction de la règle de politique monétaire en présence d'un choc de demande négatif (absence d'arbitrage) : taux de chômage  $u = 10\%$  et écart d'inflation  $(\pi - \pi^T) = -2\%$

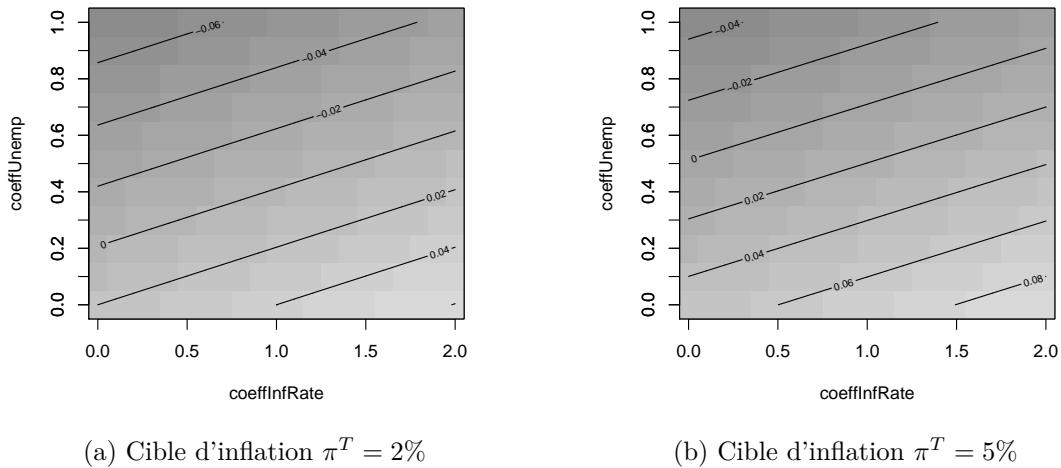


FIGURE 3.6 – Taux d'intérêt nominal en fonction des coefficients de réaction de la règle de politique monétaire en présence d'un choc d'offre (arbitrage) ; taux de chômage  $u = 10\%$  et écart d'inflation  $(\pi - \pi^T) = +2\%$

Il est intéressant de faire le parallèle avec la situation observée actuellement dans les pays en ciblage de l'inflation : les anticipations d'inflation à long terme sont ancrées sur une cible faible mais positive sans pour autant permettre au choc de demande négatif que constitue la crise financière de 2008 d'être contrecarré. Le chapitre suivant revient sur l'importance de la valeur de la cible en fonction du contexte de la volatilité de l'apprentissage, mesurée par  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutK}$  (cf. section I, chapitre 4).

En résumé, nous pouvons souligner la proposition suivante :

**Proposition 1** *Certaines configurations de paramètres mènent de manière mécanique la dynamique du modèle vers une "spirale dépressive", marquée par une forte déflation et l'explosion du taux de chômage, et ce malgré l'ancrage des anticipations sur la cible positive d'inflation. Ce phénomène produit des effets assimilables à ceux d'un choc de demande négatif de grande ampleur. En tentant de contrecarrer ce choc, la banque centrale bute sur le plancher zéro du taux d'intérêt nominal.*

L'évaluation par le modèle *probit* nous a permis de constater comment l'espace de tirage des paramètres peut être à l'origine du problème de non-viabilité d'une majorité des économies issues des simulations de la configuration (1). Grâce au modèle *probit*, nous cherchons maintenant à estimer la probabilité d'éviter une spirale dépressive en fonction de la valeur des paramètres. Nous pourrons ensuite déterminer des domaines de variation précis des paramètres pour lesquels ce problème a de grandes chances d'être évité en vue de réaliser l'analyse de sensibilité détaillée sur un modèle viable. La sous-section qui suit explicite cette démarche et détaille la règle de décision qui permet de restreindre les domaines de variation des paramètres.

## I.4 Solution apportée au problème de "spirale dépressive" de l'économie

Un arbitrage émerge entre la garantie d'une probabilité de viabilité élevée de l'économie et la taille du domaine de variation retenu. En effet, si ce dernier est trop restreint, l'analyse de sensibilité risque de ne pas identifier précisément les effets des paramètres sur la dynamique de l'économie et sur les stratégies des agents. Cependant, pour certains paramètres, conserver un domaine de variation assez vaste ne peut être obtenu qu'au prix d'une probabilité de viabilité de l'économie moins satisfaisante. Dans ce cas, l'échantillon retenu pour l'analyse de sensibilité risque de ne pas être exploitable s'il comporte trop de runs non-viables. Nous adoptons alors la règle de décision suivante :

**Règle de décision de la restriction du domaine de variation des paramètres** Sont retenus les domaines de variation pour lesquels la probabilité de viabilité de l'économie est estimée à au moins 95%. Cependant, nous acceptons de retenir une probabilité un peu inférieure si cette exigence restreint de manière excessive l'espace de tirage des paramètres ou si les paramètres concernés sont centraux pour notre question de recherche.

Dans un premier temps, nous choisissons de nous focaliser sur le domaine de variation de  $\mu$ ,  $\varepsilon$  et  $\bar{b}_0$  pour deux raisons. D'une part, ces trois paramètres ont des effets très fortement significatifs dans

le modèle *probit* (i.e. les probabilités critiques associées sont les plus faibles, typiquement inférieures à 2e-16, cf. tableau 3.2). D'autre part,  $\varepsilon$  et  $\bar{b}_0$  sont des paramètres exogènes de la "mécanique" du modèle et n'ont pas d'équivalent dans les modèles analytiques usuels de la politique monétaire. Ajuster ces paramètres pour obtenir un modèle minimal cohérent ne réduit pas la robustesse du modèle et ne limite pas la portée de l'analyse économique. Ce ne serait pas le cas si l'on choisissait par exemple de réduire l'espace de tirage des paramètres de la règle de la banque centrale alors que ceux-ci ont aussi un effet très significatif dans le modèle *probit*.

Nous adoptons alors les restrictions suivantes : la borne supérieure de  $\varepsilon$  est limitée à 0.04, pour une moyenne du domaine de variation de 0.025 et la richesse initiale minimale passe à 5 unités, pour une moyenne de 7.5 unités. Ainsi, le tableau II en annexe II donne les probabilités de viabilité de l'économie prévues par le modèle *probit* pour cette nouvelle configuration des paramètres  $\varepsilon$  et  $\bar{b}_0$  et différentes valeurs de  $\mu$ , les valeurs des autres paramètres étant fixées au centre de leurs domaines de variation initiaux de la configuration (1). Ce tableau indique que la probabilité estimée d'éviter une spirale dépressive dans cette nouvelle configuration atteint 95% si  $\mu$  vaut au maximum 25%. Une telle restriction semble justifiable dans la mesure où le domaine de variation initial de  $\mu$  a été choisi très large (jusqu'à une marge de 100% sur le coût marginal) alors que les estimations retenues dans la littérature pour ce paramètre sont beaucoup plus modestes (7.88% pour Goodfriend & King (1997), 11% pour Rotemberg & Woodford (1998)).

Dans un second temps, une fois ces restrictions adoptées, le tableau C.5 en annexe II compare les probabilités d'éviter une spirale dépressive lorsque les paramètres  $\mu$ ,  $\varepsilon$  et  $\bar{b}_0$  sont fixés au milieu de leur domaine de variation initial (configuration (1), respectivement 0.5, 0.1 et 5) et au milieu de leur domaine de variation restreint (configuration (2), respectivement 0.25, 0.025 et 7.5). Lorsque les valeurs des autres paramètres n'apparaissent pas explicitement, ils sont supposés fixés au milieu de leur domaine de variation initial de la configuration (1). Pour chaque paramètre, nous appliquons la règle de décision ci-dessus.

Ainsi, nous imposons plusieurs restrictions supplémentaires.

i) La probabilité estimée d'éviter une spirale dépressive atteint 95% si  $\alpha$  est limité à 0.4. Nous excluons par la suite le cas  $\alpha = 0.5$ . La majorité des estimations empiriques de l'élasticité de la production vis-à-vis du travail (i.e. du paramètre  $1 - \alpha$ ) se trouvant au delà de 0.5 (voir Oeffner (2008, pp. 173-174)), cette restriction n'apparaît pas fondamentale à la portée de l'analyse. Woodford (2003b) retient ainsi  $\alpha = 0.25$ .

ii) Le taux de consommation minimale  $\underline{k}$  est limité à 20% (i.e.  $\underline{k} \in [0.20, 0.5]$ ) et le plafond d'endettement minimum est fixé à 30% (i.e.  $\bar{k} \in [1.3, 2]$ ). Rappelons que ces bornes sont introduites dans

le modèle en raison de contraintes inhérentes à la modélisation à base d’agents (voir encadré 2.3, page 95 au chapitre 2). Ainsi, tant que leurs valeurs restent réalistes, elles ne semblent pas décisives pour la validation du modèle.

iii) Nous excluons également une cible d’inflation nulle. Cette restriction est en phase avec la pratique de l’ensemble des banques centrales en régime de ciblage de l’inflation.

iv) Enfin, nous excluons des probabilités d’imitation supérieures à 20%, ce qui garantit une probabilité estimée de viabilité du modèle de 92%. De telles valeurs ne permettent certes pas d’atteindre le seuil retenu de 95% mais l’apprentissage est une modalité centrale du modèle. Nous avons alors le souci de ne pas imposer trop de contraintes sur ce processus. Pour cette même raison, nous ne restreignons pas non plus la probabilité de mutation, bien qu’une probabilité inférieure à 3% ne garantisse pas non plus le seuil de 95%. De même, nous choisissons de ne pas limiter les coefficients de réaction de la règle de politique monétaire. Les domaines de variation des autres paramètres ( $\sigma_{mutK}$ ,  $\sigma_{mutW}$  et  $\rho$ ) sont maintenus comme dans la configuration (1) puisqu’ils n’influencent pas significativement la probabilité d’occurrence d’une spirale dépressive.

Nous obtenons ainsi la configuration (2), donnée dans le tableau 3.1, page 116 pour l’analyse de sensibilité du modèle.

## II Analyse de sensibilité

Les données issues de la simulation de la configuration (2) indiquent que 24358 des 26000 observations sauvegardées, soit près de 94% de l’échantillon total sont des configurations viables, i.e. caractérisées par un taux de chômage inférieur à 90%. En ne conservant que la dernière période, 1183 runs sur les 1300 peuvent être considérés comme viables, soit 91%. La volonté de ne pas restreindre les paramètres jugés centraux à l’analyse – à savoir les paramètres de la politique monétaire et de l’apprentissage – ainsi que l’erreur inhérente à l’estimation du modèle de prévision *probit* expliquent que nous n’atteignons pas le seuil de 95% de runs viables. La figure 3.7 nous indique les configurations de paramètres pour lesquelles le modèle converge encore vers des situations dépressives. Il s’agit des configurations repérées à la section précédente, notamment les cas où : i) le pouvoir de marché est fort (cas-limites retenus  $\mu = \{0.24, 0.25\}$ ), ii) l’ajustement de la demande de travail est plutôt brutal (cas limite retenu  $\varepsilon = 0.04$ ) et iii) la réaction de la banque centrale au taux de chômage est forte (typiquement supérieure à 0.8). Cependant, les chocs d’apprentissage sur les deux coefficients  $\gamma_w$  et  $\gamma_k$  ont maintenant un effet sur la dynamique du modèle. Lorsque ceux-ci sont très forts (i.e très proches de 0.5), l’économie est déstabilisée et risque davantage de converger vers une situation dépressive.

Si les chocs sur le coefficient de substitution  $\gamma_k$  sont particulièrement forts, ce qui traduit une forte variabilité de l'ajustement de la consommation aux changements du taux d'intérêt, un plafond d'endettement potentiel  $\bar{k}$  plutôt élevé (typiquement supérieur à 1.6) permet d'éviter de tomber dans une spirale dépressive. Là encore, le rôle positif de  $\bar{k}$  sur la viabilité du modèle avait été pointé durant l'analyse préalable.

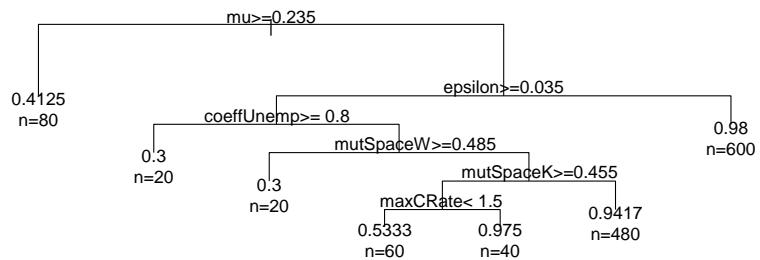


FIGURE 3.7 – Valeur espérée de la variable *sustEco* dans l'échantillon total de la configuration (2) – 1300 observations

Ainsi, l'analyse discriminante des configurations de paramètres menée à la section précédente s'avère pertinente : celles responsables de la convergence mécanique du modèle vers une spirale dépressive ont été en majorité exclues et les cas-limite retenus expliquent les runs dépressifs encore présents dans l'échantillon de la configuration 2. Nous choisissons alors de ne retenir que les runs viables, soit 1183 runs (23660 données) pour mener l'analyse de sensibilité. Nous pouvons ainsi identifier le rôle des paramètres sur les stratégies des agents et la dynamique macroéconomique émergente sans que les résultats soient entachés par leur rôle sur cette configuration particulière du modèle. Dans les analyses suivantes, en particulier concernant le rôle des anticipations (cf. section III), nous prenons le soin d'initialiser les paramètres à des valeurs qui excluent de manière quasi-certaine cette convergence *mécanique* du modèle vers ce type de configurations<sup>8</sup>.

## II.1 Caractérisation des variables-réponses

Les principales variables-réponses retenues pour l'analyse de sensibilité sont, d'une part, les variables macroéconomiques qui correspondent aux objectifs de la banque centrale (écart d'inflation à

8. Ceci ne veut pas dire que nous excluons les possibilités de spirales déflationnistes de notre modèle. Nous excluons seulement les configurations de paramètres qui ne sont pas empiriquement fondées mais qui mènent le modèle de façon *mécanique* vers ce type d'équilibres. La suite de l'analyse révèle en effet que ce type de situations peut arriver notamment en raison du désancrage des anticipations d'inflation privées par rapport à l'objectif de la banque centrale (cf. section III).

la cible et taux de chômage) et, d'autre part, les stratégies moyennes qui se diffusent dans la population de ménages (stratégies d'indexation et de substitution). Ainsi, nous cherchons à identifier les déterminants de ces variables aussi bien que les liens entre elles avec un objectif double : i) repérer les configurations de paramètres qui les influencent et celles qui ne jouent pas de rôle significatif et ii) s'assurer que le modèle produit des comportements cohérents. Dans la suite, les paramètres du modèle seront fixés pour concentrer l'analyse sur l'impact des anticipations d'inflation des agents sur la dynamique macroéconomique et les performances de la banque centrale. Ainsi, le point i) nous permet de caractériser les *scenarii* d'initialisation des paramètres. Le point ii) contribue à valider le modèle. Tout au long du développement, les relations émergentes cohérentes entre les variables sont soulignées sous forme de propositions.

### II.1.1 Liste des variables-réponses

Le tableau 3.3 indique la liste des variables-réponses contenues dans l'analyse de sensibilité qui suit ainsi que leurs étiquettes, ce dans le but de faciliter la lecture des graphiques. Rappelons que les variables étant sauvegardées toutes les 50 périodes, on a  $t = \{50, 100, \dots, 950, 1000\}$ , soit 20 observations par run et  $n = 500$  ménages.

### II.1.2 Statistiques descriptives des variables-réponses

Dans un premier temps, nous décrivons la distribution des variables-réponses dans l'échantillon retenu, composé de 23660 observations (20 périodes retenues pour chacun des 1183 runs). Les figures 3.8 donnent la répartition globale des principales variables-réponses dans l'ensemble des 23660 observations recueillies. De manière générale, les performances macroéconomiques sont satisfaisantes : l'écart d'inflation moyen est négligeable (précisément 0.2%) et la moitié des relevés du taux d'inflation se trouve entre -1% et +2% de la cible. Notons que la distribution de l'écart d'inflation a un aspect symétrique autour de zéro. Ceci s'explique vraisemblablement par la manière dont les chocs aléatoires ont été introduits dans le modèle. En effet, le processus de mutation de l'apprentissage des agents s'effectue par tirage aléatoire dans une loi normale, symétrique par nature. Nous revenons ci-après sur les liens entre ces chocs et la dynamique de l'écart d'inflation. Le taux de chômage moyen est inférieur à 6% (précisément 5.9%) et la moitié des observations est caractérisée par une situation de plein-emploi (taux de chômage nul). Cependant, les observations macroéconomiques montrent une forte dispersion : les écarts-types de l'écart d'inflation et du taux de chômage valent respectivement 3.5% et 14.5%. Rappelons que les observations *outliers* ne sont pas représentées sur les boîtes à moustache dans le but de les rendre plus lisibles.

Etiquette	Expression	Définition
Variables centrales		
<i>infGap</i>	$\pi_t - \pi^T$	écart du taux d'inflation à la cible (en $t$ )
<i>absInfGap</i>	$ \pi_t - \pi^T $	idem en valeur absolue
<i>infGapSqr</i>	$(\pi_t - \pi^T)^2$	idem au carré
<i>unemp</i>	$u_t$	taux de chômage (en $t$ )
<i>unempSqr</i>	$(u_t)^2$	idem au carré
<i>meanCoeffWageUpdate</i>	$\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{i,t}^w}{n}$	moyenne des stratégies d'indexation parmi les ménages (en $t$ )
<i>meanCoeffSubst</i>	$\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_{i,t}^k}{n}$	moyenne des stratégies de substitution parmi les ménages (en $t$ )
Autres variables		
<i>relDevCoeffWageUpdate</i>	$\frac{Var(\gamma_{i,t}^w)}{Mean(\gamma_{i,t}^w)}$	coefficient de variation des stratégies d'indexation des ménages en $t$
<i>relDevCoeffSubst</i>	$\frac{Var(\gamma_{i,t}^k)}{Mean(\gamma_{i,t}^k)}$	coefficient de variation des stratégies de substitution des ménages en $t$
<i>meanNomBonds</i>	$\sum_{i=1}^n \frac{b_{i,t}}{n}$	moyenne des détentions nominales des ménages en $t$
<i>priceLevel</i>	$P_t$	niveau général des prix en $t$ (i.e. prix de vente du bien)
<i>meanConsumptionRate</i>	$\sum_{i=1}^n \frac{k_{i,t}}{n}$	taux de consommation moyen des ménages en $t$
<i>debtRatio</i>	$\sum_{i=1}^n \frac{b_{i,t}/P_t}{\tilde{y}_{i,t}}$	taux d'endettement moyen des ménages en $t$ (par rapport au revenu permanent)
<i>intRate</i>	$i_t$	taux d'intérêt nominal
<i>realIntRate</i>	$i_t - \pi_t$	taux d'intérêt réel <i>ex post</i> en $t$
<i>expRealIntRate</i>	$i_t - \sum_{i=1}^n \frac{\pi_{i,t}^e}{n}$	taux d'intérêt réel <i>ex ante</i>
<i>welfare</i>	$\sum_{i=1}^n u_{i,t}$	bien-être agrégé dans l'économie en $t$ (somme des utilités individuelles)
<i>distToPotUtility</i>	$\sum_{i=1}^n u_{i,t} - nu_{i,t}^*$	distance en $t$ de l'utilité agrégée à l'utilité potentielle <sup>a</sup>

Tableau 3.3 – Listes des variables-réponses

a. L'utilité potentielle  $u^*$  correspond à l'utilité retirée par un ménage lorsque toute la capacité productive est utilisée et que chaque ménage consomme une part égale des biens disponibles (i.e. à l'équilibre symétrique du modèle). La production vaut alors  $Y = n^{1-\alpha}$  et si chaque ménage en consomme une part égale, l'utilité potentielle vaut  $u_i^* = \ln(Y/n) = -\alpha \ln(n)$ ,  $\forall i$ . Ainsi, l'utilité effective et l'utilité potentielle sont négatives et au maximum nulles, i.e. dans le cas où  $\alpha = 0$ .

En ce qui concerne les comportements moyens des agents, on remarque que les coefficients d'indexation dans la population de ménages sont élevés : en moyenne, ils atteignent 1.26 et près des deux-tiers des observations sont supérieures à l'unité. Rappelons que l'inflation anticipée, dans cette configuration, est supposée égale à la cible chaque période et pour tous les agents. Pour que la banque centrale atteigne sa cible (en situation de plein-emploi), il faut alors que les coefficients d'indexation

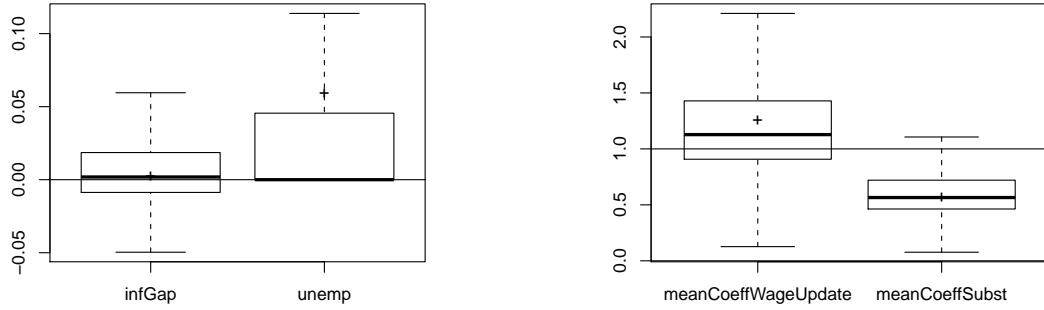


FIGURE 3.8 – Répartition de l’écart de l’inflation à sa cible, du taux de chômage et des coefficients moyens d’indexation  $\gamma_w$  et de substitution  $\gamma_k$  dans la population de ménages dans l’ensemble des données de la configuration (2) – 23660 observations toute période et tout run confondus (outliers exclus)

moyens soient proches de un (cf. équations (2.87) et (2.88), page 106). Ces comportements d’indexation forts risquent par conséquent d’engendrer des pressions inflationnistes. Nous revenons également, dans la suite, sur les liens entre les comportements d’indexation et la dynamique de l’inflation. Par ailleurs, les coefficients  $\gamma_k$  moyens sont positifs (pour une moyenne de 0.57) : l’effet de substitution domine largement dans la population de ménages. Ce cas est favorable à la stabilisation de la demande par la politique monétaire puisqu’il garantit qu’une augmentation du taux d’intérêt nominal freine la demande (cf. sous-section III.5, chapitre 2). Ceci ne veut pas dire qu’il n’y a pas du tout de stratégie d’effet de revenu (i.e. des coefficients  $\gamma_k$  négatifs) qui émerge du modèle. En effet, des individus peuvent favoriser l’effet de revenu mais ils restent suffisamment peu nombreux dans la population pour que la moyenne des comportements soit dominée par l’effet de substitution. De plus, les *outliers* n’étant pas représentés sur les graphiques, les observations caractérisées par des coefficients  $\gamma_k$  négatifs existent mais restent marginales. Par ailleurs, de même que pour les performances macroéconomiques, une forte dispersion caractérise les données des comportements des agents : l’écart-type est de 0.63 pour le comportement d’indexation moyen et de 0.48 pour le comportement de substitution.

Les figures 3.9 donnent plus d’information : les variables y sont réparties par expérience. Premièrement, on constate une grande hétérogénéité des valeurs selon les configurations de paramètres. Prenons le cas du taux de chômage par exemple : une moitié des observations est caractérisée par des taux de chômage très faibles et souvent nuls alors qu’à l’opposé, une dizaine d’expériences révèle des taux de chômage très élevés et beaucoup plus volatiles. On voit également que certaines expériences sont caractérisées par la dominance de l’effet de revenu (i.e. des coefficients  $\gamma_k$  moyens négatifs). Deuxiè-

mément, les observations de l'écart d'inflation et des comportements moyens semblent positivement et assez nettement corrélées. Ce point est à détailler dans la suite de l'analyse. Enfin, ces graphiques nous permettent de montrer que la réplication de 20 runs est suffisante pour obtenir, globalement, des échantillons représentatifs malgré le caractère aléatoire des simulations. En effet, pour une majorité d'expériences, les boîtes à moustaches ne montrent pas une grande variabilité des données recueillies. Notons, de plus, que ces boîtes à moustaches incluent toutes les périodes sauvegardées de chacun des 20 runs et que l'hétérogénéité restante reflète aussi l'hétérogénéité entre les périodes d'un même run.

Avant de passer à l'analyse de sensibilité, il reste deux remarques nécessaires à la validation de notre modèle. D'une part, nous avons insisté, dans le descriptif du modèle, sur la nécessité de contenir les dynamiques explosives de l'endettement des ménages (voir encadré 2.3, page 95 au chapitre 2). La figure 3.10 montre l'évolution des détentions moyennes des agents en valeur réelle sur l'ensemble des runs et des expériences<sup>9</sup>. On y voit que la valeur réelle des détentions des ménages reste en médiane très proche de zéro quelle que soit les configurations de paramètres retenues et présente même une convergence vers zéro pour une proportion importante des runs. Ainsi, on peut considérer que le modèle à base d'agents reproduit de manière satisfaisante les conditions de transversalité imposées dans les modèles analytiques.

D'autre part, la figure 3.11 donne l'évolution de la distance entre le bien-être agrégé et le bien-être potentiel parmi toutes les expériences et les runs. L'écart à l'utilité potentielle tend à diminuer très nettement, se stabilisant au bout de 800 à 900 périodes en médiane près de -500. Ceci appelle trois remarques. Premièrement, ce chiffre peut paraître élevé. Cependant, les utilités potentielles des agents sont calculées à l'équilibre symétrique théorique où tous les agents ont la même consommation. Or, notre modèle à base d'agents est caractérisé par une hétérogénéité des ménages, tant sur le plan des stratégies adoptées que des revenus et de la consommation qui en découlent. Ainsi, étant donné cette hétérogénéité, même si toute la production potentielle est consommée, les non-linéarités dans l'agrégation des utilités retirées par chaque ménage peuvent expliquer une telle distance. De plus, la valeur de l'utilité potentielle dépend naturellement de la valeur de  $\alpha$  (cf. tableau 3.3). Les valeurs ne sont donc pas directement comparables entre elles d'une expérience à l'autre : le message se résume à la tendance globale. C'est l'objet de la deuxième remarque. L'apprentissage est l'une des composantes principales de notre modèle. Le processus d'apprentissage des ménages étant évalué par l'utilité, la tendance globale à l'accroissement du bien-être agrégé est suffisante pour indiquer que l'apprentissage fonctionne d'une manière cohérente. Troisièmement, le fait que l'amélioration du bien-être semble se

9. Rappelons que la richesse initiale de chaque agent est tirée uniformément entre 5 et 10 dans la configuration (2) et que le niveau des prix est initialisé à 1. La détention réelle initiale moyenne est donc comprise entre 5 et 10.

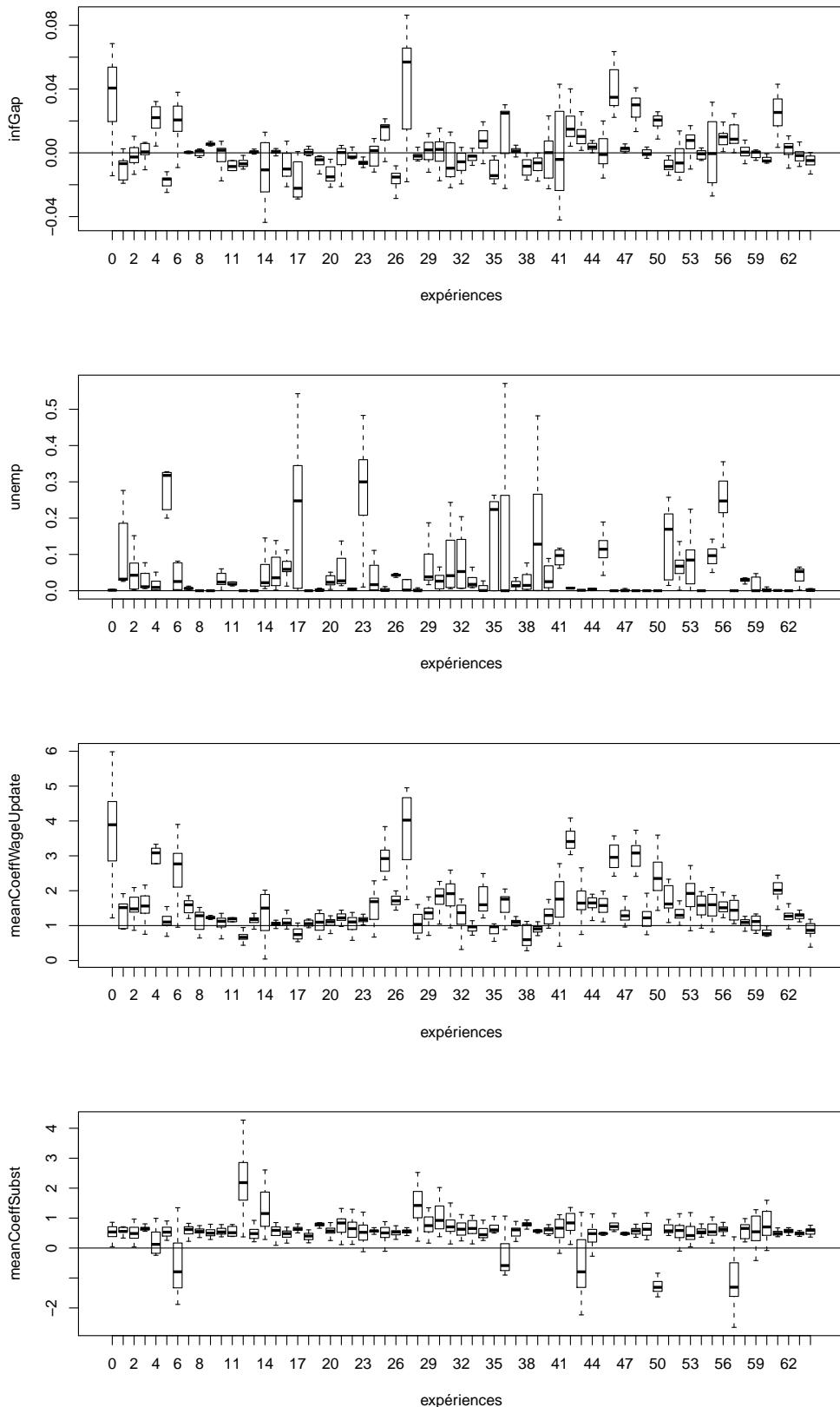


FIGURE 3.9 – Répartition selon les 65 expériences de l’écart d’inflation à la cible, du taux de chômage et des coefficients moyens d’indexation  $\gamma_w$  et de substitution  $\gamma_k$  dans la population de ménages dans l’ensemble des données de la configuration (2) – 23660 observations tout run et toute période confondus (outliers exclus)

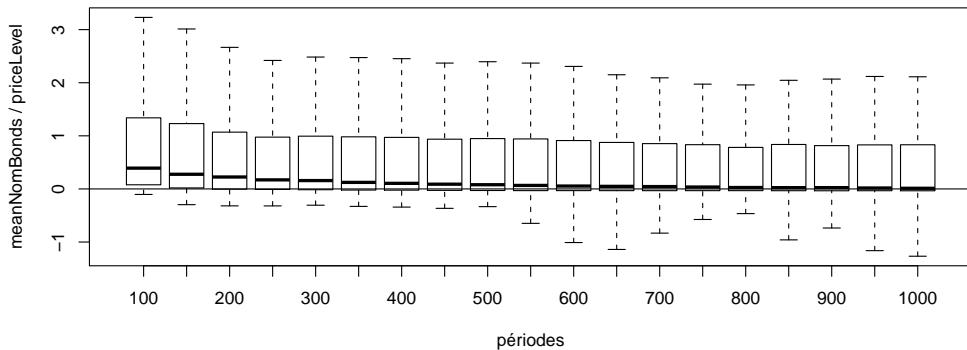


FIGURE 3.10 – Evolution des détentions moyennes des ménages (en valeur réelle) dans l'ensemble des données de la configuration (2) – 23660 observations toute expérience et tout run confondus (*outliers* exclus)

stabiliser au bout de 800/900 périodes nous montre qu'il est suffisant de lancer le modèle sur 1000 périodes.

Nous pouvons ainsi mettre en évidence la proposition générale suivante :

**Proposition 2** *En l'absence de perturbations éventuelles liées au désancrage des anticipations d'inflation, le modèle montre un fonctionnement global cohérent pour une large variété de configurations de paramètres. En particulier :*

- *L'ordre de grandeur des valeurs prises par les objectifs de la banque centrale ainsi que des stratégies moyennes des ménages apparaît réaliste.*
- *Le bien-être agrégé dans l'économie montre une tendance croissante, signe net du bon fonctionnement de l'apprentissage dans le modèle.*
- *Les dynamiques explosives des valeurs réelles (détentions des agents) ont été exclues.*

Néanmoins, la forte variabilité observée à travers les différentes expériences, tant dans les comportements des agents que dans les variables macroéconomiques, indique un rôle non-négligeable des différentes configurations de paramètres. C'est l'objet de l'analyse de sensibilité qui suit. Nous menons cette analyse grâce à des modèles de kriging. Les rapports de ces modèles ainsi que les graphiques des effets marginaux et des surfaces de réponse sont donnés en annexe III. Ces résultats sont parfois étayés par des statistiques descriptives, des arbres de régression ou des tests statistiques lorsque cela s'avère intéressant pour la compréhension des effets mis en évidence.

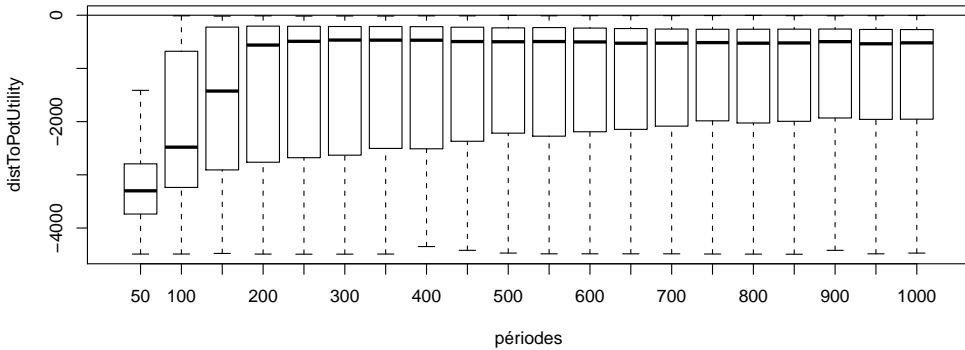


FIGURE 3.11 – Evolution de la distance du bien-être agrégé au bien-être potentiel dans l’ensemble des données de la configuration (2) – 23660 observations toute expérience et tout run confondus (*outliers* exclus)

## II.2 Impact des facteurs sur les variables macroéconomiques du modèle

A chaque fois, nous intégrons, dans les modèles de kriging, les 14 paramètres retenus dans la configuration (2) (voir tableau 3.1, page 116). Tout d’abord, nous cherchons à identifier les déterminants de l’écart de l’inflation à sa cible en valeur absolue.

### II.2.1 Déterminants de l’écart de l’inflation à sa cible (en valeur absolue)

Quatre paramètres apparaissent jouer un rôle significatif sur l’objectif d’inflation de la banque centrale : la probabilité d’imiter *probImit*, les chocs sur le comportement d’indexation *mutSpaceW*, le coefficient de réaction à l’inflation *coeffInfRate* et la cible d’inflation *infTarget* (voir rapport C.1 en annexe III).

De manière prévisible, plus les chocs sur le comportement d’indexation sont forts, plus l’inflation s’écarte de sa cible. En effet, nous avons vu à la sous-section III.5 au chapitre précédent que les coefficients d’indexation traduisent des effets de second-tour. Si les chocs sur ces coefficients sont forts, il en résulte une forte variabilité du taux de croissance du salaire nominal, donc du taux de croissance du niveau des prix (équations (2.63) et (2.87), voir encadré 3.1, page 118). Les effets de ces chocs sont comparables à ceux des chocs sur les prix du modèle NK, qui entraînent eux-aussi une variabilité de l’inflation. Il apparaît aussi qu’un apprentissage social fort favorise la stabilisation de l’inflation autour de sa cible. Cet effet provient sûrement de l’influence de l’imitation sur la valeur moyenne des coefficients d’indexation. Nous revenons sur ce lien dans la suite de l’analyse de sensibilité (cf. sous-

section II.3.1). Par ailleurs, plus la banque centrale réagit à l'inflation, plus celle-ci est contenue près de sa cible, suggérant que la politique monétaire fonctionne de manière cohérente dans le modèle. Le rôle de la cible d'inflation peut paraître plus surprenant : plus la cible est élevée, moins la banque centrale parvient à stabiliser l'inflation autour de sa cible. Pour comprendre l'origine de cet effet, regardons l'interaction particulièrement marquée entre la cible et les chocs sur le comportement d'indexation donnée par la surface de réponse (cf. figure C.1 en annexe III). Les figures 3.12 et 3.13, ci-après dans le texte, complètent aussi la lecture de ce phénomène.

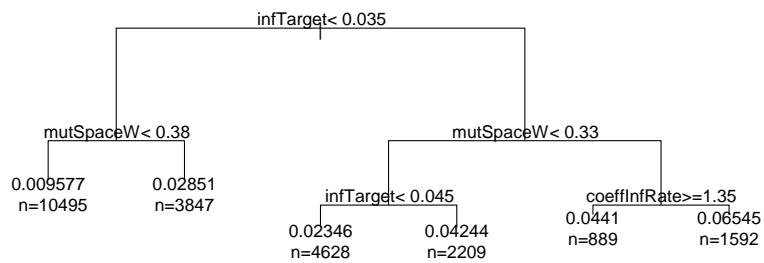


FIGURE 3.12 – Valeur espérée de l'écart de l'inflation à sa cible (en valeur absolue) dans la configuration (2) en fonction des 14 paramètres – 23660 observations

Rappelons que dans la configuration retenue, l'inflation anticipée est ancrée sur la cible d'inflation. Si la cible est élevée et que les comportements d'indexation varient fortement du fait de chocs  $\gamma^w$  de forte ampleur, les salaires nominaux désirés sont d'autant plus volatils (équation (3.6)). Il en résulte une variation du niveau du prix d'autant plus forte (équation (2.87)). La figure 3.12 nous montre qu'une forte réaction à l'inflation (supérieure à 1.3) est nécessaire dans cette situation pour limiter l'écart d'inflation. La figure 3.13 donne l'écart d'inflation en fonction du niveau de la cible : l'écart d'inflation est toujours en moyenne et en médiane très proche de zéro quelle que soit la valeur de la cible mais l'inflation est beaucoup plus volatile à mesure que la cible augmente. En effet, le taux de croissance des salaires nominaux de chaque agent  $i$  est donné par  $(\gamma_i^w \pi_i^e)$ , avec  $\pi_i^e = \pi^T, \forall i$  (cf. équation (3.6)) et la combinaison de fortes variations des coefficients  $\gamma_i^w$  avec une cible d'inflation élevée produit mécaniquement de fortes variations de l'écart d'inflation. L'examen de la figure 3.13 montre que l'écart d'inflation est plutôt symétrique autour de zéro. Ceci s'explique par les tirages normaux des chocs sur les coefficients  $\gamma_i^w$ . Une légère dissymétrie vers un écart d'inflation positif émerge tout de même pour une cible forte (typiquement 5%). Nous montrons ci-après que ceci est dû au fait qu'une inflation

forte favorise des coefficients d’indexation globalement supérieurs à l’unité. Notre modèle fait ainsi émerger une régularité empirique reconnue (voir par exemple Ram (1985)) : le niveau et la variabilité de l’inflation sont positivement corrélés.

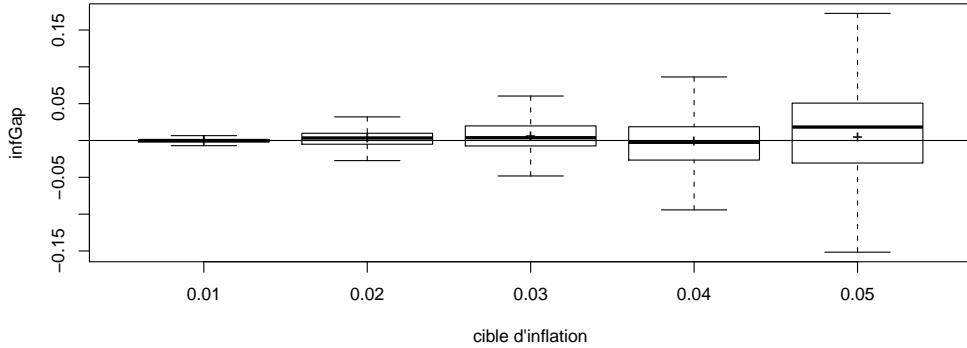


FIGURE 3.13 – Ecart de l’inflation à sa cible (en valeur absolue) en fonction de la valeur de la cible dans la configuration (2) – 23660 observations (outliers exclus)

Nous pouvons alors souligner la proposition suivante.

**Proposition 3** *Les chocs sur le comportement d’indexation des salaires nominaux éloignent l’inflation de la cible d’autant plus que l’inflation anticipée (ici ancrée sur la cible) est forte, produisant une corrélation fortement positive entre le niveau et la variabilité de l’inflation. Une forte réaction de la banque centrale à l’inflation limite cet effet.*

Nous nous intéressons maintenant aux déterminants du niveau du chômage.

### II.2.2 Déterminants du taux de chômage

Le modèle de kriging montre que six paramètres s’avèrent déterminants pour le taux de chômage (voir annexe III, rapport C.2) : les coefficients de réaction de la règle de Taylor – *coeffInfRate* et *coeffUnemp*, le paramètre de rendements d’échelle – *alpha*, le paramètre d’ajustement de la demande de travail au profit – *epsilon*, la borne inférieure de la propension à consommer – *minCRate* – et la cible d’inflation *infTarget*.

L’effet des coefficients de politique monétaire dépend très fortement de la valeur des rendements d’échelle de la fonction de production (effets d’interaction). En effet, le paramètre  $\alpha$  est l’élasticité du travail embauché vis-à-vis du prix (voir équation (3.1)). Plus  $\alpha$  est élevé, plus le prix s’ajuste aux variations du travail (ou réciproquement du chômage). Dans ce cas, si le chômage augmente (donc le

$\alpha = 0$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.2$	$\alpha = 0.3$	$\alpha = 0.4$
-0.006 (0.941)	0.053 (0.378)	0.108 . (0.057)	0.233*** (8e-05)	0.387*** (1e-06)
Signif. codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1				

FIGURE 3.14 – Tests de corrélation de Pearson entre l'écart d'inflation en valeur absolue (*absInfGap*) et le taux de chômage en fonction des valeurs de  $\alpha$  dans la configuration (2) (23660 observations, probabilités-critiques associées entre parenthèses)

travail embauché diminue), le prix diminue – et inversement – et la banque centrale ne fait pas face à un arbitrage entre ses deux objectifs. Dans cette situation, la surface de réponse indique qu'une forte réaction à l'inflation parvient bien mieux à stabiliser le chômage qu'une forte réaction au chômage seule. Ceci provient sans doute du fait qu'une forte réaction au taux de chômage expose davantage la banque centrale au problème du plancher zéro du taux d'intérêt nominal (voir figures 3.5 et 3.6, page 127). En revanche, dans le cas limite des rendements constants ( $\alpha = 0$ ), le prix ne réagit plus aux variations de l'emploi et l'évolution des deux objectifs de la banque centrale est décorrélée : la banque centrale est en situation d'arbitrage. Dans ce cas, plus les autorités monétaires favorisent l'inflation au détriment du chômage (i.e.  $\phi_\pi$  élevé mais  $\phi_u$  faible), plus le taux de chômage est fort. Au contraire, en réagissant seulement au taux de chômage, le banque centrale atteint de manière satisfaisante son objectif d'emploi. Le tableau 3.14 donne la corrélation entre l'écart d'inflation (en valeur absolue) et le taux de chômage selon les différentes valeurs de  $\alpha$  et confirme cette analyse.

L'efficacité de la politique monétaire, en particulier de la réaction à l'inflation, est aussi favorisée par un paramètre  $\varepsilon$  fort : plus  $\varepsilon$  est élevé, plus la demande de travail est réactive face aux variations du profit et plus le taux de chômage est faible. Ceci est vrai que la banque centrale soit en situation d'arbitrage ou non.

Par ailleurs, la borne  $k$  exerce globalement un effet négatif sur l'emploi. Ceci peut s'expliquer de deux façons. D'une part, lorsque  $k$  est élevé, les valeurs de la propension à consommer sont plus limitées et la banque centrale a moins de marge de manœuvre pour faire varier la demande. D'autre part, une borne  $k$  élevée limite le taux d'épargne des ménages et, par ricochet, leurs revenus futurs. Ceci peut avoir un impact négatif sur la demande et ainsi sur l'emploi.

Enfin, nous soulignons le rôle de la cible d'inflation : plus la cible est élevée, plus le chômage est fort. Nous expliquons ce phénomène par le raisonnement suivant. La firme réagit aux variations de son profit en termes réels, qui ne dépend pas de la variation du salaire nominal agrégé  $W$  : l'augmentation des salaires nominaux entraîne une hausse équivalente du prix (cf. équations (2.84) et (3.3)). De plus, on a montré le lien positif entre l'inflation et l'inflation anticipée (ici la cible). Plus la cible est forte,

plus l'écart d'inflation est volatile et on observe un léger biais en faveur d'un écart d'inflation positif lorsque la cible est forte. Ce contexte provoque une réaction de la banque centrale qui passe par une augmentation du taux d'intérêt nominal lorsque l'écart d'inflation est positif. En retour, une forte volatilité de l'écart d'inflation entraîne une plus grande volatilité du taux d'intérêt nominal et, par ricochet, des taux d'intérêt réels *ex ante* et *ex post* (cf. figures 3.15). Comme les anticipations sont ancrées sur la cible (i.e.  $\pi_{i,t}^e = \pi^T$ ), lorsque la banque centrale rate la cible (i.e.  $\pi_t \neq \pi^T$ ), les agents commettent des erreurs d'anticipations de l'inflation (i.e.  $\pi_{i,t+1}^e \neq \pi_t$ ). Comme l'indique la figure 3.15, plus la cible est forte, plus les taux d'intérêt réels *ex ante* et *ex post* divergent. Dans le cas d'une cible de 5%, les agents anticipent en moyenne un taux d'intérêt réel négatif et empruntent davantage, puisque l'effet de substitution domine largement. Or, *ex post*, le taux d'intérêt réel s'avère en moyenne positif et les agents subissent le coût de l'endettement. Cet effet limite la demande future et est renforcé par les contraintes imposées sur le comportement d'endettement des agents (cf. encadré 2.3, page 95 au chapitre 2). La figure 3.16 montre en effet que les ménages butent davantage sur la borne supérieure  $\bar{k}$  de la propension à consommer lorsque la cible est forte. Ainsi, les agents sont plus souvent endettés lorsque la cible est forte et surtout, butent davantage sur la contrainte d'un ratio d'endettement de 50% introduit pour éviter des dynamiques de surendettement. Lorsque l'endettement total du ménage dépasse 50% de son revenu permanent estimé, rappelons que l'agent ne peut plus emprunter mais doit, au contraire épargner. Enfin, en réaction au taux de chômage, les actions de la banque centrale bute sur le plancher zéro du taux d'intérêt nominal même lorsque la cible est forte (cf. figure 3.15). Ces effets se conjuguent pour limiter la demande et créent un chômage plus élevé lorsque la cible est forte que lorsqu'elle est faible.

D'une manière générale, on peut conclure que, dans notre modèle, un environnement plus volatile est défavorable à l'emploi. Cette situation est largement reconnue par la théorie économique, qui fait de la *stabilisation* macroéconomique un des objectifs clés de la banque centrale<sup>10</sup>. Ceci attribue à notre modèle un point supplémentaire en faveur de sa validation pour l'analyse de politiques monétaires.

En résumé, nous avons la proposition suivante :

**Proposition 4** *Le taux de chômage est influencé de manière cohérente par la banque centrale, en fonction de l'existence ou non d'un arbitrage entre ses deux objectifs et des coefficients de réaction de la règle de politique monétaire. D'une manière générale, un environnement marqué par une forte variabilité des taux d'intérêt et d'inflation est défavorable à l'emploi.*

---

10. Ainsi, les fonctions de perte usuelles de la banque centrale incluent non pas l'écart d'inflation et l'écart de production (ou un autre indicateur de la conjoncture économique) mais leurs variances (voir Svensson (1999)).

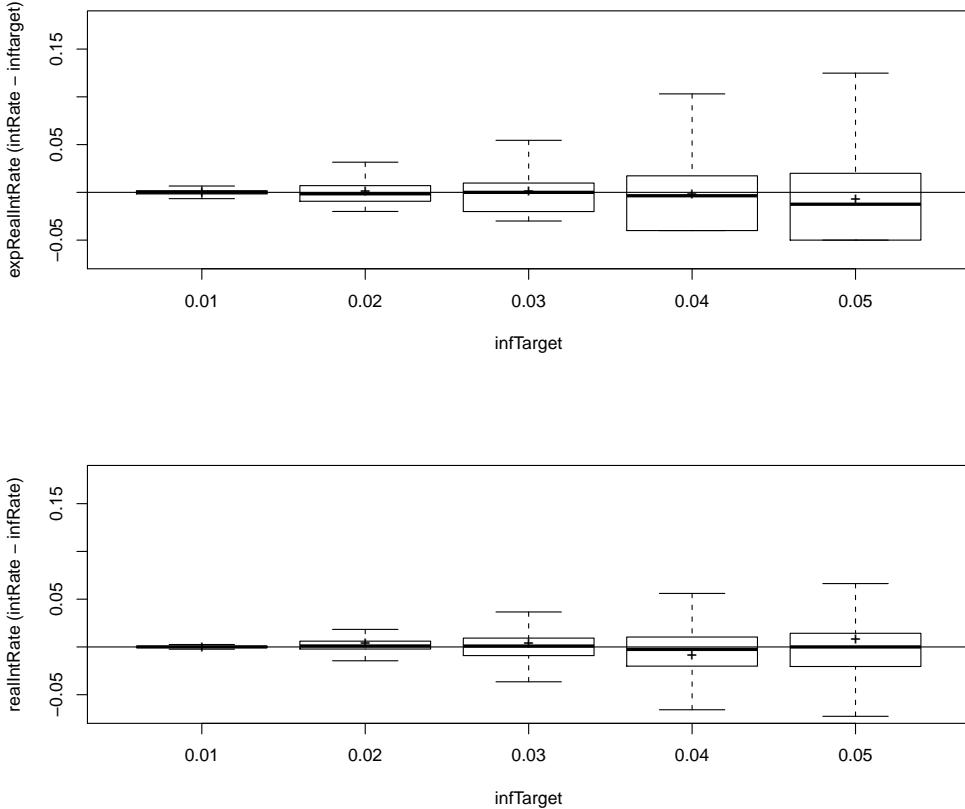


FIGURE 3.15 – Taux d’intérêt réel *ex ante* (en haut) et *ex post* (en bas) en fonction de la valeur de la cible dans la configuration (2) – 23660 observations (outliers exclus)

### II.3 Impact des paramètres sur les stratégies des ménages

Tout comme ci-dessus, nous intégrons dans le modèle de kriging les 14 paramètres du plan d’expérience. Le but est de mettre en relation les résultats obtenus avec les déterminants des variables macroéconomiques identifiés ci-dessus. Nous pouvons par là identifier les liens entre les stratégies des agents qui se diffusent et la dynamique macroéconomique émergente. Ceci nous permet d’établir que le modèle montre un comportement cohérent.

#### II.3.1 Déterminants du comportement moyen d’indexation du salaire nominal désiré sur l’inflation anticipée (moyenne des coefficients $\gamma^w$ )

Le modèle de kriging identifie quatre déterminants de la stratégie d’indexation moyenne : la probabilité d’imiter *probImit*, les chocs sur le coefficient d’indexation *mutSpaceW*, la cible d’inflation *infTarget* (qui est aussi l’inflation anticipée ici) ainsi que la vitesse d’ajustement de la demande de travail aux variations du profit *epsilon* (cf. rapport C.3 an annexe III).

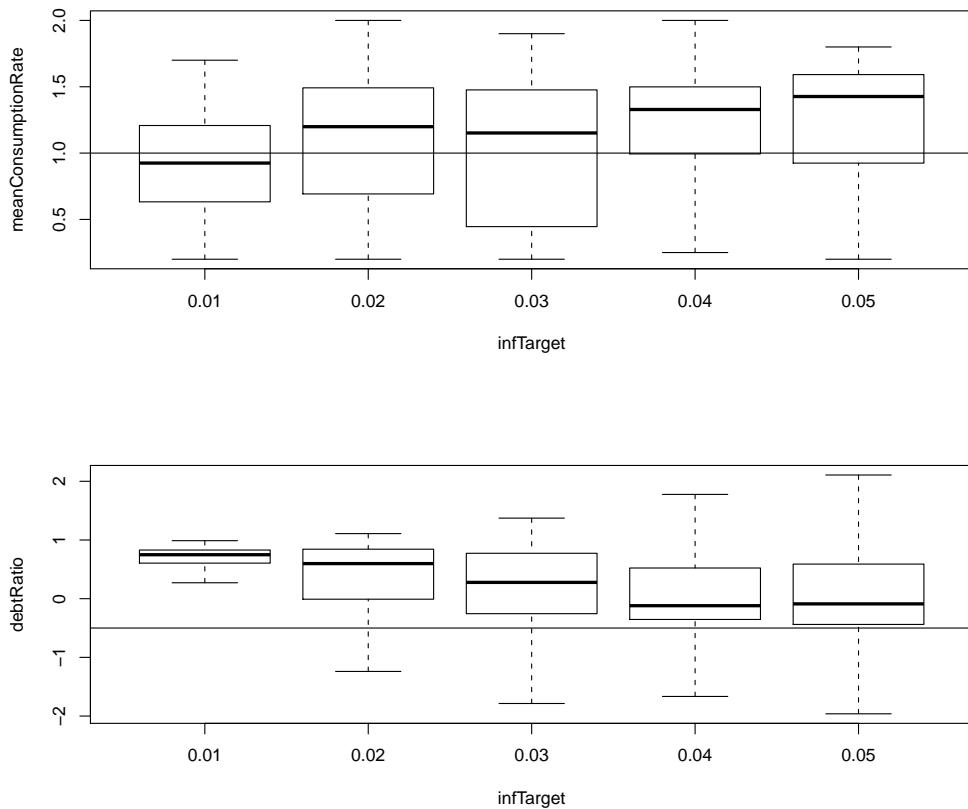


FIGURE 3.16 – Propension à consommer moyenne (en haut) et ratio d’endettement moyen des ménages (en bas) en fonction de la valeur de la cible dans la configuration (2) – 23660 observations (outliers exclus)

Les deux premiers paramètres montrent que le processus d’apprentissage influence significativement le comportement d’indexation des agents. Conformément à l’intuition, plus les chocs  $\sigma_{mutW}$  sont forts, plus des comportements d’indexation forts tendent à apparaître dans la population de stratégies des ménages. Cet effet seul est déjà très net mais apparaît renforcé par un processus d’apprentissage social fort : les comportements d’indexation très élevés apparus grâce à un vaste processus de mutation ( $\sigma_{mutW}$  fort) se diffusent d’autant plus que la probabilité d’imiter est forte. Cet effet montre la cohérence de la dynamique émergente de l’apprentissage et contribue par là à valider le modèle.

Rappelons également que l’écart d’inflation s’est révélé corrélé à ces deux paramètres. Plus la probabilité d’imitation est forte, plus l’écart d’inflation est faible et plus les chocs  $\sigma_{mutW}$  sont forts, plus l’inflation est éloignée de sa cible. Il en va de même pour la cible d’inflation : nous voyons que plus elle est élevée, plus les comportements d’indexation sont forts. Or, nous avons aussi souligné plus haut qu’une cible forte détériorait les performances de la banque centrale en matière de stabilisation

de l'inflation. Le lien fort et positif entre l'écart d'inflation et le comportement moyen en matière d'indexation du salaire nominal, pointé aux paragraphes II.1.2 et II.2.1, semble se confirmer. Ce lien apparaît naturel, l'équation (3.1) page 122 le montre clairement. Le tableau 3.17 rapporte les résultats de tests de corrélation entre les stratégies moyennes des agents et les performances macroéconomiques et confirme très nettement cette relation. Il faut souligner qu'il s'agit d'une *corrélation* et que cette relation peut être lue théoriquement dans les deux sens. D'une part, plus l'environnement est inflationniste, plus les agents sont exigeants en matière d'indexation salariale. Dans la configuration retenue, rappelons que la cible d'inflation correspond au taux par rapport auquel les agents indexent leurs salaires désirés. En effet, plus la cible, et en retour l'inflation effective, sont fortes, plus la perte de pouvoir d'achat est forte en cas d'indexation inférieure à l'unité<sup>11</sup>. Il y a donc un *effet d'échelle* avec une inflation (et une cible) forte. Ce raisonnement justifie le fait que les agents semblent se préoccuper davantage de l'inflation quand celle-ci est élevée et ont tendance à la négliger lorsque les taux d'inflation sont faibles<sup>12</sup>. D'autre part, le fait que les agents indexent fortement les salaires nominaux sur l'inflation contribue en retour à renforcer la dynamique inflationniste. En effet, la force des comportements d'indexation traduit l'intensité des *effets de second tour*. Un comportement d'indexation fort (typiquement supérieur à un) entraîne alors une hausse des salaires nominaux (et donc du prix) d'autant supérieure au taux ciblé que la cible est forte<sup>13</sup>. Nous retrouvons, ici aussi, l'effet d'échelle induit par une cible forte. Cet effet explique la corrélation positive très forte entre le niveau de la cible et celui de l'écart d'inflation souligné au paragraphe II.2.1.

Par ailleurs, plus la vitesse d'ajustement de la demande de travail, mesurée par le paramètre  $\varepsilon$  est forte, plus des comportements d'indexation forts émergent. Rappelons que  $\varepsilon$  est aussi corrélé négativement au taux de chômage. Ceci suggèrerait qu'un taux de chômage plus faible favorisera des comportements plus exigeants en matière salariale. Cependant, la cible d'inflation est aussi corrélée, positivement, à la fois avec le taux de chômage et les comportements d'indexation, suggérant un lien contraire. Le tableau 3.17 montre que c'est la première hypothèse qui prime. Ceci est cohérent avec

11. Prenons un exemple, en supposant que la cible d'inflation est en moyenne atteinte. Si la cible d'inflation, et donc l'inflation moyenne, est de 1% et que le comportement d'indexation moyen est un peu inférieur à l'unité (0.9 par exemple), les ménages subissent une chute de  $(1 - 0.9) \times 1\% = 0.1\%$  de leur salaire réel. Mais, si l'inflation (et la cible) valent 5%, la perte de pouvoir d'achat atteint  $(1 - 0.9) \times 5\% = 0.5\%$ .

12. Cet élément fait écho à la définition donnée par Greenspan (2001) de la stabilité des prix : "price stability obtains when economic agents no longer take account of the prospective change in the general price level in their economic decision-making".

13. Prenons là aussi un exemple. En supposant que le plein emploi est atteint, si les agents adoptent un coefficient d'indexation moyen de 1.25, le salaire nominal agrégé, et par rebond le prix, vont croître au taux  $1.25 \times \pi^T$  (cf. équation (3.1)). Si la cible d'inflation est faible (par exemple 1%), le taux de croissance du prix atteindra  $\pi_t = 0.01 \times 1.25 = 1.25\%$  et l'écart d'inflation  $\pi_t - \pi^T = 0.25\%$ . En revanche, dans des conditions égales, si la cible vaut 5%, l'inflation effective vaudra  $0.05 \times 1.25 = 6.25\%$  et l'écart d'inflation sera plus élevé (1.25%).

	mean( $\gamma^w$ )	mean( $\gamma^k$ )
$ \pi - \pi^T $	0.47*** ( $< 2.2e - 16$ )	-0.057*** ( $< 2.2e - 16$ )
$u$	-0.19*** ( $< 2.2e - 16$ )	-0.047*** ( $7e - 13$ )
Signif. codes : 0 '****, 0.001 '***, 0.01 **, 0.05 *, 0.1 , , 1		

FIGURE 3.17 – Tests de corrélation de Pearson entre les stratégies moyennes des ménages et les performances macroéconomiques sur l’échantillon total (27198 degrés de liberté, probabilités-critiques associées entre parenthèses)

la logique de rationnement mise en place sur le marché du travail. Lorsque la demande de travail est inférieure à l’offre, la firme embauche en priorité les ménages les moins exigeants en matière salariale. Ces ménages touchent alors des revenus salariaux alors que des ménages trop exigeants risquent d’être au chômage et de ne toucher aucun revenu du travail. Les ménages avec une plus grande demande sont ensuite servis en premier sur le marché du bien. Le processus d’imitation étant basé sur la quantité consommée (*via* la fonction d’utilité), il est plus probable qu’une stratégie de faible indexation se diffuse en période de chômage. Le mécanisme inverse se met en place dès que le plein-emploi est atteint. Ces effets sont également rapportés par la littérature empirique et ont été mis en évidence dès les travaux de Phillips (1958) et Lipsey (1960), dans la lignée Keynésienne ainsi qu’intégrés au modèle WS-PS (wage setting/ price setting) de Layard et al. (1991).

Nous étudions de même les déterminants du comportement d’ajustement de la propension à consommer en fonction du taux d’intérêt réel anticipé.

### II.3.2 Déterminants du comportement moyen de réaction du taux de consommation au taux d’intérêt réel (moyenne des coefficients $\gamma^k$ )

De même que dans l’analyse du comportement d’indexation, quatre paramètres sont déterminants dans le modèle de kriging (cf. rapport C.4, annexe III) : la probabilité d’imiter *probImit*, les chocs sur le coefficient de substitution *mutSpaceK*, le coefficient de réaction à l’inflation *coeffInfRate* ainsi que la vitesse d’ajustement de la demande de travail aux variations du profit  $\varepsilon$ .

Le rôle significatif des paramètres d’apprentissage  $P_{imit}$  et  $\sigma_{mutK}$  dans la détermination du comportement de consommation confirme le bon fonctionnement des règles comportementales postulées dans le modèle et contribue à sa validation. Notons tout de même que l’ajustement du modèle est un peu moins bon que pour les trois variables-réponses précédentes. Ceci vient sans doute du fait que l’on observe une variabilité moindre entre les différentes observations pour ce coefficient que pour les trois précédentes variables analysées (cf. figures 3.9). C’est seulement dans un environnement i)

d'apprentissage social fort ( $P_{init}$  fort) et/ou ii) de choc  $\sigma_{mutK}$  forts iii) et/ou d'ajustement rapide de la demande de travail ( $\varepsilon$  fort) que les valeurs moyennes des coefficients de substitution deviennent beaucoup plus variables. Sinon, la majorité des observations est confinée entre 0.5 et 0.7. Ces trois points peuvent aisément se comprendre. En effet, ils correspondent à des cas où l'environnement des ménages est plus volatile (points ii) et iii)). Tout comme pour le comportement d'indexation, un fort apprentissage social favorise la diffusion de stratégies de substitution atypiques (très fortes ou au contraire très faibles), apparues grâce à un processus de mutation fort ( $\sigma_{mutK}$  élevé).

Toutefois, une configuration attire notre intérêt particulièrement : celle qui donne lieu à des coefficients  $\gamma^k$  négatifs. Rappelons que des coefficients  $\gamma^k$  positifs correspondent à la prédominance de l'effet de substitution consommation/épargne induit par l'augmentation du taux d'intérêt réel alors que des coefficients  $\gamma^k$  négatifs traduisent la prédominance de l'effet de revenu (cf. sous-section III.5 au chapitre précédent). Le canal du taux d'intérêt sur la demande de la politique monétaire passe par l'effet de substitution<sup>14</sup>. Ainsi, on s'attend à ce que de forts coefficients positifs  $\gamma^k$  permettent une meilleure efficacité de la politique monétaire. En effet, à anticipations d'inflation fixées, faire varier la demande nécessite alors un mouvement moindre dans le taux d'intérêt nominal (cf. équation (2.68)). Les données du tableau 3.17 confirment cette intuition, soulignant que la politique monétaire fonctionne de manière efficace dans le modèle : plus le coefficient moyen  $\gamma^k$  est élevé, mieux la banque centrale stabilise l'économie, que ce soit en ce qui concerne le chômage ou l'inflation. Nous remarquons néanmoins que le comportement de substitution est moins fortement corrélé aux objectifs de la banque centrale que le comportement d'indexation. Ceci suggère que le canal des anticipations joue un rôle prépondérant dans la détermination des performances macroéconomiques, en ligne avec la littérature sur le sujet (Woodford (2005)).

Cependant, la surface de réponse indique que des coefficients  $\gamma^k$  négatifs émergent dans une situation où le coefficient de réaction à l'inflation est très élevé et les chocs  $\sigma_{mutK}$  sont de forte ampleur. L'effet de  $\sigma_{mutK}$  semble naturel : plus l'espace des mutations est large, plus les agents ont la possibilité de s'écartez des stratégies initiales (tirées entre 0 et 1), i.e. plus ils ont la possibilité d'orienter la population de stratégies vers des coefficients très forts (typiquement supérieurs à 1) ou, au contraire, négatifs. Pour ce qui est du coefficient de réaction à l'inflation, rappelons que c'est un déterminant de l'écart d'inflation. Plus la banque centrale réagit à l'inflation, plus celle-ci est proche de la cible. Par la règle de politique monétaire postulée (cf. équation (2.78)), de fortes valeurs de  $\phi_\pi$  devraient induire de fortes valeurs du taux d'intérêt nominal, et en retour, du taux d'intérêt réel. La figure 3.18

---

14. Ce canal peut aussi passer par l'effet richesse dans le cas où les agents sont débiteurs. Dans ce cas, une augmentation du taux d'intérêt réel alourdit la charge de la dette de l'agent et limite la demande, freinant ainsi l'activité. Cependant, ce n'est pas l'effet mis en avant par les modèles NK.

confirme très nettement cette hypothèse : plus le coefficient de réaction à l’inflation est élevé, plus le taux d’intérêt réel est fort. Lorsque la réaction à l’inflation est faible (typiquement inférieure à 1), le taux d’intérêt réel est en moyenne négatif et inversement.

L’action du coefficient de réaction à l’inflation sur le comportement de substitution s’explique alors par le taux d’intérêt réel, soit le rendement de l’épargne. Lorsque celui-ci est négatif, la surface de réponse montre des coefficients moyens  $\gamma^k$  élevés dans la population de ménages, typiquement proches de 1. En effet, le contraire serait incohérent. Un coefficient  $\gamma^k < 0$  alors que  $r^e < 0$  reviendrait à épargner au détriment de l’endettement (i.e. baisser  $k$ ) alors que le taux de rendement espéré de l’épargne est négatif et que réciproquement, le coût du crédit est négatif (cf équation (2.68), page 94 ou encadré 3.1, page 118). Dans ce cas, si le taux d’intérêt réel anticipé est négatif, les ménages privilégient l’endettement plutôt qu’une stratégie d’épargne (cf. figure 3.18). Au contraire, lorsque la réaction à l’inflation est très forte, le taux d’intérêt réel est positif. Dans ce cas, c’est l’effet de revenu qui domine l’effet de substitution, i.e. on observe des coefficients  $\gamma^k < 0$ . Ceci semble cohérent dans la mesure où cette configuration implique un fort rendement réel de l’épargne. Les agents privilégient alors une position créditrice (cf. figure 3.18). Il faut souligner que dans ce cas (agents créateurs et effet de revenu dominant), le canal de transmission de la politique monétaire à la demande ne fonctionne plus et fonctionne même à l’envers : une hausse des taux provoque une hausse des revenus *via* une hausse du rendement réel des détentions des agents et en retour de la demande, soutenant au contraire l’activité.

Ce résultat montre que les ménages développent un comportement cohérent dans leurs décision de consommation – à condition que le processus d’exploration de l’espace des stratégies leur permettent d’avoir accès à ces stratégies innovantes, i.e. que l’espace des mutations  $\sigma_{mutK}$  soit assez large.

Nous obtenons alors la proposition suivante :

**Proposition 5** *Les stratégies des ménages issues du processus d’apprentissage sont fortement liées aux objectifs de la banque centrale. Les canaux de transmission de la politique monétaire montrent ainsi un fonctionnement cohérent. En particulier :*

- *Une forte corrélation positive émerge entre le comportement d’indexation, l’inflation anticipée et l’inflation effective : le canal des anticipations marche de manière cohérente.*
- *Le comportement de substitution consommations présente/futures émerge en fonction des niveaux des taux d’intérêt réels : le canal du taux d’intérêt fonctionne correctement.*

*Il semble néanmoins que le canal des anticipations soit prépondérant dans l’effet de la politique monétaire.*

Jusque là, nous avons fait l’hypothèse que les anticipations d’inflation des ménages sont parfaite-

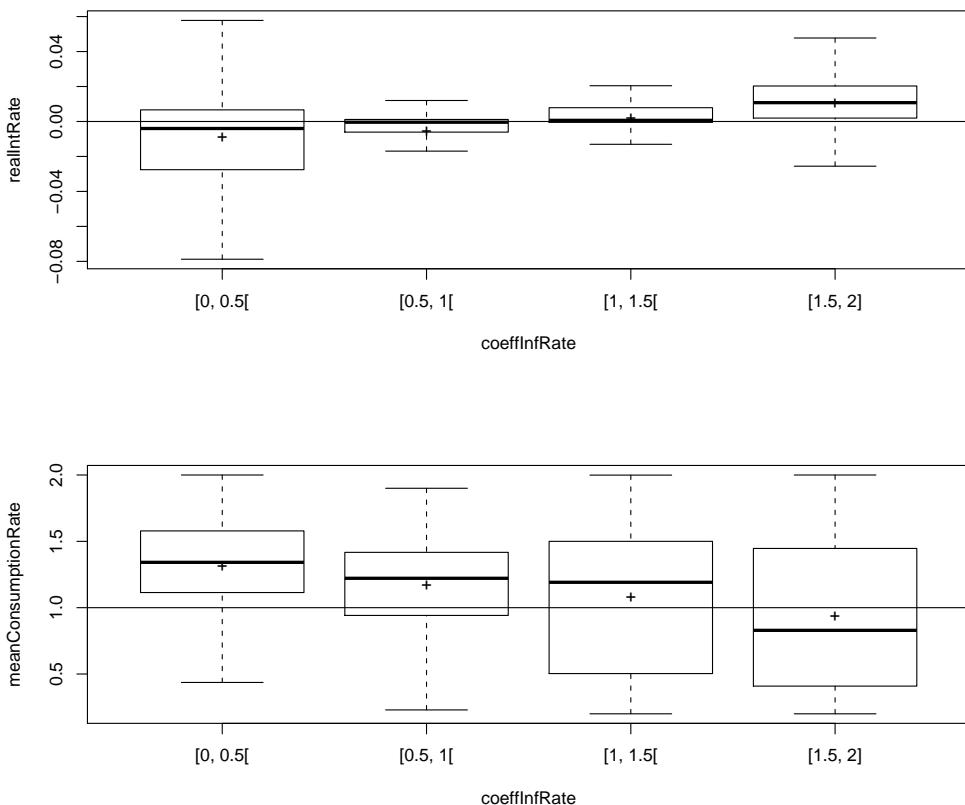


FIGURE 3.18 – Taux d’intérêt réel *ex post* et taux de consommation moyen en fonction des valeurs du coefficient de réaction à l’inflation dans la configuration (2)– 23660 observations (outliers exclus)

tement ancrées sur la cible. Ceci nous a permis d’isoler l’impact des paramètres de l’économie sur la dynamique émergente du modèle et les liens entre les stratégies des agents et les performances de politique monétaire. Les différents résultats mis en évidence tendent à i) identifier les paramètres les plus influents sur le modèle et à ii) valider le modèle en soulignant les comportements cohérents des agents qui en émergent.

Nous commençons maintenant à focaliser l’analyse sur la dynamique des anticipations et les performances macroéconomiques en résultant. Pour ce faire, nous relâchons maintenant l’hypothèse d’ancrage des anticipations d’inflation sur la cible pour comparer les performances de la règle de politique monétaire en fonction du mode de fixation des anticipations des ménages. Nous pouvons ainsi isoler l’impact des anticipations d’inflation sur la dynamique du modèle, en particulier interroger les conséquences d’un manque de crédibilité ou de clarté de l’objectif d’inflation annoncé.

### III Effets des anticipations d’inflation des ménages sur les performances de la politique monétaire

Le mécanisme de formation des anticipations est toujours spécifié de manière exogène dans cette section. Il s’agit en effet de montrer les situations les plus favorables du point de vue de la performance de la banque centrale et de confronter les résultats du modèle à ceux établis dans la littérature. Une fois cette étape franchie, le mécanisme de formation des anticipations pourra être endogénérisé pour focaliser l’analyse sur la manière dont la banque centrale peut l’influencer et orienter les anticipations des agents (c’est l’objet du chapitre suivant). Cette section présente i) les différentes configurations d’anticipations retenues et ii) un comparatif des résultats obtenus<sup>15</sup>.

#### III.1 Protocole de simulation (configuration 3)

Nous établissons d’abord comment nous spécifions les anticipations d’inflation des ménages dans le modèle, et l’objectif de chacun des scenarii retenus, puis nous donnons le protocole de simulation. La configuration à l’étude est la configuration (3), les valeurs de paramètres sont données au tableau 3.1, page 116.

##### III.1.1 Différents scenarii d’anticipations d’inflation des ménages

A chaque période  $t$ , chaque ménage  $i$  forme son anticipation d’inflation  $\pi_{i,t+1}^e$  pour la période suivante. Nous définissons 5 *scenarii* d’anticipations d’inflation. Chacun d’eux est conçu pour représenter différents degrés de crédibilité et de précision de la cible annoncée par la banque centrale et différents niveaux de coordination entre les agents. Formellement, chaque ménage  $i$  anticipe l’inflation de la manière suivante :

$$\pi_{i,t+1}^e = \chi \pi_i^p + (1 - \chi) \tilde{\pi}_t \quad (3.7)$$

où  $\pi_i^p$  correspond à la cible que l’agent  $i$  perçoit,  $\tilde{\pi}$  est la tendance passée de l’inflation, établie comme une moyenne mobile des taux passés (sur le même modèle que l’équation (2.77), page 100 par exemple) et  $\chi$  est un paramètre entre 0 et 1, commun à tous les ménages. Sur la base de la formulation générale (3.7), le tableau 3.4 décrit les 5 scenarii.

La *coordination* des anticipations se définit comme une situation où tous les ménages partagent la même anticipation d’inflation en tout temps. De plus, plus la communication de la banque centrale est précise, plus la cible perçue par les agents  $\pi_i^p$  est proche de la cible adoptée par la banque centrale

---

15. Les résultats de cette section sont développés dans Salle, Yıldızoglu & Sénégas (2012).

	$\pi_i^p$	$\chi$	$\pi_{i,t+1}^e$	crédibilité	précision	coordination
1	$\pi^T, \forall i$	1	$\pi^T, \forall i, t$	totale	parfaite	oui
2	$\pi^p \sim N(\pi^T, \sigma_\xi)^a, \forall i$	1	$\pi^T + \xi, \forall i, t$	totale	bruitée	oui
3	$\pi_i^p \sim N(\pi^T, \frac{\sigma_\xi}{n})^a$	1	$\pi^T + \xi_i, \forall t$	totale	bruitée	non
4	$\pi^p = \pi^T, \forall i$	$\in ]0, 1[$	$\chi\pi^T + (1 - \chi)\tilde{\pi}_t, \forall i$	partielle	parfaite	oui
5	$\pi^p = \pi^T, \forall i$	0	$\tilde{\pi}_t, \forall i$	aucune	parfaite	oui

Tableau 3.4 – Les 5 scenarii d'anticipations d'inflation (configuration 3)

<sup>a</sup> Les deux tirages normaux sont tronqués à zéro pour éviter que les agents ne perçoivent des cibles négatives. Dans le scenario 3, chaque cible individuelle perçue est tirée dans une loi normale de moyenne  $\pi^T$  comme dans le scenario 2, mais avec un écart-type égal à  $\sigma_\xi/n$  de sorte que les  $n$  tirages individuels introduisent un bruit équivalent au seul tirage du scenario 2.

$\pi^T$ . Si la cible est parfaitement claire, alors  $\pi^p = \pi^T$ . Par ailleurs,  $\chi$  représente le degré de crédibilité de la cible, c'est-à-dire la mesure dans laquelle les anticipations des agents sont ancrées dessus. Plus  $\chi$  est proche de l'unité, plus la crédibilité de la cible est forte. Ceci rejoint la définition de la crédibilité d'une cible d'inflation donnée par Faust & Svensson (2001) : la crédibilité est mesurée comme moins la valeur absolue de la distance entre la cible annoncée et les anticipations d'inflation des agents.

Ainsi, le scenario 1 est le cas de référence dans lequel la banque centrale communique parfaitement sa cible, qui est parfaitement crédible : les anticipations des agents sont coordonnées dessus, à chaque période. Ce scenario est le plus proche du modèle NK de base, dans lequel les anticipations privées sont compatibles avec les objectifs de la banque centrale.

Les scenarii 2 et 3 introduisent du bruit dans la communication de la banque centrale (voir notamment Demertzis & Vieggi (2009), Ueda (2010) ou Lipinska & Yates (2010) pour une telle spécification du bruit). Dans les deux cas,  $\xi$  représente le degré d'imprécision de l'annonce de la banque centrale. La cible est crédible dans les deux cas, dans le sens où tous les agents se reposent entièrement sur elle pour former leurs anticipations ( $\chi = 1$ ) mais ce signal n'est pas perçu de la même façon dans les deux scenarii : dans le scenario 2, tous les ménages perçoivent la même cible bruitée, leurs anticipations sont donc coordonnées, alors que dans le scenario 3, chaque ménage perçoit sa propre cible, rendant les anticipations d'inflation hétérogènes. Certes, la banque centrale connaît avec exactitude sa cible et, en cas de parfaite crédibilité, la cible perçue devrait correspondre à la vraie valeur. Cependant, cette cible bruitée peut s'interpréter dans un sens plus large, comme une approximation de l'information que la banque centrale communique dans son ensemble, incluant par exemple sa propre anticipation d'inflation et cette information est en majeure partie bruitée (Dale et al. (2011)). Ce scenario est conçu pour examiner les conséquences de la coordination des anticipations d'inflation sur un mauvais signal, entraînant une divergence entre la banque centrale et les agents. Ce cas est intéressant car il fait écho

au débat, initié par la contribution de Morris & Shin (2002), quant aux limites de la communication de l’information publique lorsque celle-ci est fortement imprécise dans la mesure où les agents ont tendance à se reposer entièrement sur ce type d’informations (cf. sous-section II, chapitre 1). C’est aussi le cas dans le scenario 2 car nous posons  $\chi = 1$ . Dans le scenario 3, des différences entre les agents dans la perception de la cible communiquée par la banque centrale peuvent s’expliquer de différentes façons : des points de vue divergents dans les comités de politique monétaire peuvent contribuer à entourer la communication de la banque centrale d’incertitude et mener à différentes interprétations de celle-ci ; les annonces de la banque centrale peuvent aussi être perçues de manière distincte par les individus ou diffusées de manière différente par les media (à ce sujet, voir les contributions rassemblées dans Blinder et al. (2008)). Dans ce scenario, le bruit  $\xi$  représente alors une sorte de bruit privé et les ménages ont des anticipations différentes.

Les scenarii 4 et 5 permettent d’analyser les conséquences du manque de crédibilité de la banque centrale : les ménages perçoivent parfaitement la cible de la banque centrale (i.e.  $\pi^p = \pi^T, \forall i$ ) mais ne se reposent que partiellement dessus pour former leurs anticipations (i.e.  $\chi < 1$ ). Ils prennent aussi en compte les observations passées du taux d’inflation. Cette modélisation de la crédibilité partielle est très proche de celle retenue par Brazier et al. (2008) et De Grauwe (2011). De plus, elle est en phase avec les résultats établis par Roos & Schmidt (2012), qui montrent que les observations passées sont un facteur essentiel de la formation des anticipations des agents non-économistes, tels que les ménages. Le scenario 5 correspond au cas limite d’une absence totale de crédibilité (i.e.  $\chi = 0$ ), dans lequel les agents forment des anticipations parfaitement adaptatives.

### III.1.2 Protocole de simulation et exploitation des résultats

Pour se focaliser sur l’impact des anticipations d’inflation, nous choisissons de fixer les paramètres structurels du modèle (cf. tableau 3.1, page 116, configuration 3). Nous posons  $\alpha = 0.25$  et  $\mu = 0.1$ , qui correspondent aux valeurs retenues par Rotemberg & Woodford (1998) et Woodford (2003b).  $\pi^T = 0.02$  est en phase avec les cibles d’inflation empiriquement relevées (Banque d’Angleterre, Banque de Nouvelle-Zélande, Banque du Canada par exemple). Les autres paramètres, i.e. la richesse initiale  $\bar{b}_0$ , les bornes de la propension à consommer,  $\bar{k}$  et  $\underline{k}$  et le taux d’apprentissage de la firme  $\varepsilon$  sont fixés en tenant compte des résultats obtenus à l’analyse de sensibilité ci-dessus. Comme de fortes valeurs de  $\varepsilon$  rendent le modèle instable en faisant varier l’offre de bien de manière brutale, nous fixons  $\varepsilon = 0.01$ , ce qui correspond à un apprentissage très graduel. Pour les paramètres  $\bar{k}$  et  $\underline{k}$ , leur influence n’est pas significative dès qu’on exclut des valeurs extrêmes, i.e. des valeurs qui permettent un endettement massif des ménages ou une propension à consommer très faible. On fixe alors  $\bar{k} = 1.5$  et  $\underline{k} = 0.5$ . La

richesse initiale est fixée à  $\bar{b}_0 = 10$  pour éviter les problèmes soulevés précédemment à la section I. Nous laissons la possibilité de différentes intensités d'apprentissage car c'est une modalité essentielle du modèle : l'apprentissage peut être faible –  $(P_{imit}, P_{mut}) = (0.05, 0.01)$ , modéré –  $(P_{imit}, P_{mut}) = (0.1, 0.05)$  – ou fort –  $(P_{imit}, P_{mut}) = (0.15, 0.1)$  – et  $(\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}) \in [0.05, 0.4]^2$  pour évaluer la réaction de la banque centrale à différents niveaux de chocs. On laisse aussi comme précédemment  $(\phi_\pi, \phi_u) \in [0, 2] \times [0, 1]$ . Enfin, on fixe  $\rho \in \{0, 0.45, 0.9\}$ , pour tester l'impact de différents degrés de retard dans le modèle.  $\rho = 0$  correspond à des évaluations naïves,  $\rho = 0.45$  implique la prise en compte de quelques périodes passées ( $0.45^6 < 1\%$ ) et  $\rho = 0.9$  d'un grand nombre ( $0.9^{45} < 1\%$ ). Pour les scenarii 2 et 3, le bruit  $\xi$  est tiré dans un espace large pour couvrir différents degrés d'imperfections de la communication de la cible, i.e.  $\sigma_\xi \in [0.001, 0.05]$  et de même, dans le scenario 4, on a  $\chi \in \{0.1, 0.2, \dots, 0.9\}$ .

Le plan d'expériences utilisé implique alors 17 configurations de paramètres, répliquées chacune 20 fois, comme précédemment. Ce plan est donné par le tableau C.3 en annexe I. Les variables sont initialisées comme dans les configurations 1 et 2 et on suppose  $T = 800$  périodes. En effet, nous avons souligné précédemment que ce nombre de périodes semble suffisant pour stabiliser l'utilité agrégée des ménages, permettant à l'apprentissage de fonctionner. Nous vérifions dans la suite que c'est aussi le cas dans cette configuration (cf. figures C.5 en annexe IV). De plus, ce nombre est fixé en prenant en compte des contraintes computationnelles et considérer un nombre de périodes supérieur nous expose à des explosions numériques du logiciel en cas de runs hyperinflationnistes. Chaque variable est sauvegardée toutes les 50 périodes et nous excluons les 100 premières. Nous avons donc un total de 5100 valeurs pour chacun des 5 scenarii.

Nous comparons maintenant les résultats dans les 5 scenarii. Nous décrivons d'abord le comportement du modèle lorsque la cible est parfaitement claire et crédible : c'est le scenario de référence (scenario 1). Ceci nous permet de voir la manière dont l'apprentissage affecte les performances d'un régime de ciblage de l'inflation indépendamment de l'introduction de bruit ou de manque de crédibilité de la cible. Nous étudions ensuite ces deux éléments à travers les scenarii 2 à 5 en évaluant dans quelle mesure les résultats de ces scenarii divergent de ceux obtenus dans le scenario de référence. Nous menons l'analyse grâce à des statistiques descriptives et une régression (quadratique) des performances de politique monétaire sur les paramètres de la règle de Taylor  $\phi_\pi$  et  $\phi_u$ , en contrôlant les effets des paramètres d'apprentissage. La régression quadratique nous permet d'avoir des estimations plus précises des effets de ces paramètres que la régression linéaire, d'autant plus que notre modèle est non linéaire par nature. Les indicateurs des performances macroéconomiques retenus pour la régression sont l'écart d'inflation et le taux de chômage au carré (cf. tableau 3.3, page 134). Nous complétons

également l’analyse par le critère de bien-être de Lucas (2003), qui permet de comparer les résultats de différentes politiques à partir des préférences individuelles des agents (cf. tableau 3.6, page 164).

### III.2 Le cas de référence : une cible de l’inflation parfaitement claire et crédible

Comme il a été expliqué au chapitre 2, l’économie s’écarte de l’équilibre optimal du modèle *via* deux mécanismes. Le premier provient du comportement heuristique que nous avons supposé de la part des agents. Cette variabilité est structurelle, résultant de la dynamique d’apprentissage des agents inhérente au modèle. A cet égard, les chocs  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$  introduisent de l’incertitude dans les canaux de transmission de la politique monétaire. Le second mécanisme provient des anticipations d’inflation des ménages. Dans ce scenario, les anticipations des agents étant fixées à la cible, la variabilité ne peut être que structurelle. En conséquence, on remarque que ce scenario 1 affiche la volatilité la plus faible parmi les 5, tant en ce qui concerne les comportements moyens entre les ménages, leur hétérogénéité et les performances macroéconomiques. En effet, les tests de Student à 5% nous amènent à rejeter très fortement l’hypothèse nulle selon laquelle la variance des comportements  $\gamma^k$  et  $\gamma^w$  parmi les ménages est égale dans les 5 scenarii, face à l’hypothèse alternative qu’elle est plus faible dans le scenario 1. De plus, la variabilité de l’inflation comme du chômage est la plus faible dans ce scenario. Notons que l’écart d’inflation est négatif en moyenne. Ceci vient du fait que les coefficients d’indexation moyens sont légèrement inférieurs à l’unité et en conséquence, comme on a  $\pi_{i,t+1}^e = \pi^T$ ,  $\forall i, t$ , les salaires nominaux, et ainsi le prix croissent à un taux inférieur au taux ciblé (cf. équations (2.87) et (2.88) au chapitre 2)<sup>16</sup>. De plus, les coefficients de substitution atteignent le niveau moyen le plus haut parmi les 5 scenarii (ils sont initialisés entre 0 et 1 de sorte que la moyenne initiale est proche de 0.5). Ces coefficients définissent la sensibilité de la demande à un changement du taux d’intérêt : de fortes valeurs de ces coefficients permettent à la banque centrale d’affecter l’économie *via* de faibles variations du taux d’intérêt et apparaissent préférables. Le taux de chômage approche en moyenne les 9%. Ceci peut paraître assez élevé mais cette variable montre une volatilité plutôt forte.

La figure 3.19 illustre la dynamique du modèle dans le scenario 1 et en l’absence d’une cible crédible (scenario 5). Bien que les comportements moyens qui émergent de la dynamique d’apprentissage des agents ainsi que des performances macroéconomiques diffèrent fortement entre les 2 scenarii, la différence la plus frappante concerne sans aucun doute leurs volatilités.

---

16. Un test de Student à 5% mène à rejeter l’hypothèse nulle  $\pi_t - \pi^T = 0$  contre l’hypothèse alternative  $\pi_t - \pi^T < 0$  ( $t\text{-stat}=-9.0953$ ,  $p\text{-value} < 2e-16$ ) et à rejeter l’hypothèse nulle  $\text{mean}(\gamma_{i,t}^w) = 1$  contre l’hypothèse alternative  $\text{mean}(\gamma_{i,t}^w) < 1$  ( $t\text{-stat}=-7.415$ ,  $p\text{-value} 8.23e-14$ ).

	Scenario				
	1	2	3	4	5
$\pi_t - \pi^T$	-0.0026 (0.012)	0.0029 (0.0357)	-0.0015 (0.0184)	0.0057 (0.0624)	0.0926 (0.1958)
$u_t$	0.0874 (0.2068)	0.1715 (0.3037)	0.1281 (0.2595)	0.1795 (0.2968)	0.228 (0.3239)
$mean(\gamma_{i,t}^w)$	0.9416 (0.40)	1.033 (0.36)	1.0165 (0.414)	0.995 (0.4661)	1.0875 (0.5825)
$mean(\gamma_{i,t}^k)$	0.6585 (0.1998)	0.557 (0.2832)	0.6502 (0.211)	0.6246 (0.1964)	0.5733 (0.2668)
$var(\gamma_{i,t}^w)$	0.053 (0.0495)	0.06 (0.0477)	0.0596 (0.0482)	0.059 (0.0469)	0.0552 (0.0432)
$var(\gamma_{i,t}^k)$	0.0558 (0.0508)	0.0613 (0.05)	0.0607 (0.0487)	0.0611 (0.0489)	0.0586 (0.0489)
Tests de corrélation de Pearson entre $u^2$ et $(\pi - \pi^T)^2$					
corrélation (p-value)	0.153*** (<2.2e-16)	-0.056** (0.001)	0.007 (0.667)	-0.09*** (1e-07)	-0.211*** (<2.2e-16)

Tableau 3.5 – Moyennes et écarts-types entre parenthèses des comportements des agents et des performances macroéconomiques sur l'ensemble des simulations (5100 données par scenario).

Les résultats de l'analyse économétrique, reportés au tableau C.6 en annexe IV fournissent des informations supplémentaires sur les performances plutôt satisfaisantes enregistrées dans le scenario 1. Les chocs sur les coefficients  $\gamma^w$ , qui capturent la force des effets de second-tour, ont un effet positif sur l'écart d'inflation, mais le coefficient estimé sur ce paramètre est le plus faible parmi les 5 scenarii. Au contraire, ces chocs contribuent particulièrement à éloigner l'inflation de sa cible en l'absence d'une cible crédible (scenario 5). En outre, les chocs sur les comportements de substitution n'affectent pas les performances macroéconomiques dans le scenario de référence alors qu'ils ont un impact significatif sur le taux de chômage dans le scenario 5. Globalement, l'apprentissage est associé à une meilleure convergence de l'inflation et du taux de chômage vers les objectifs des autorités monétaires, bien que son effet soit plus mitigé dans le scenario 5, par rapport au scenario 1. Dans ce dernier scenario, le processus d'apprentissage est plus efficace et plus stabilisant, dans le sens où il mène à une meilleure convergence du modèle vers les objectifs de la banque centrale et à une dynamique croissante du bien-être agrégé dans l'économie. (cf. figure 3.11). Ce résultat va dans le sens de précédents, qui ont notamment établis que l'annonce des objectifs de la banque centrale permet de l'aider à mieux stabiliser l'économie lorsque les agents sont engagés dans un processus d'apprentissage perpétuel (voir la sous-section IV au chapitre 1).

Enfin, nous comparons le rôle de la politique monétaire dans les scenarii 1 et 5. Comme le montre la figure 3.20, le rôle joué par les coefficients  $\phi_\pi$  et  $\phi_u$  de la règle de politique monétaire est très différent. Pour stabiliser l'économie, les réactions de la banque centrale sont beaucoup moins contraintes dans le

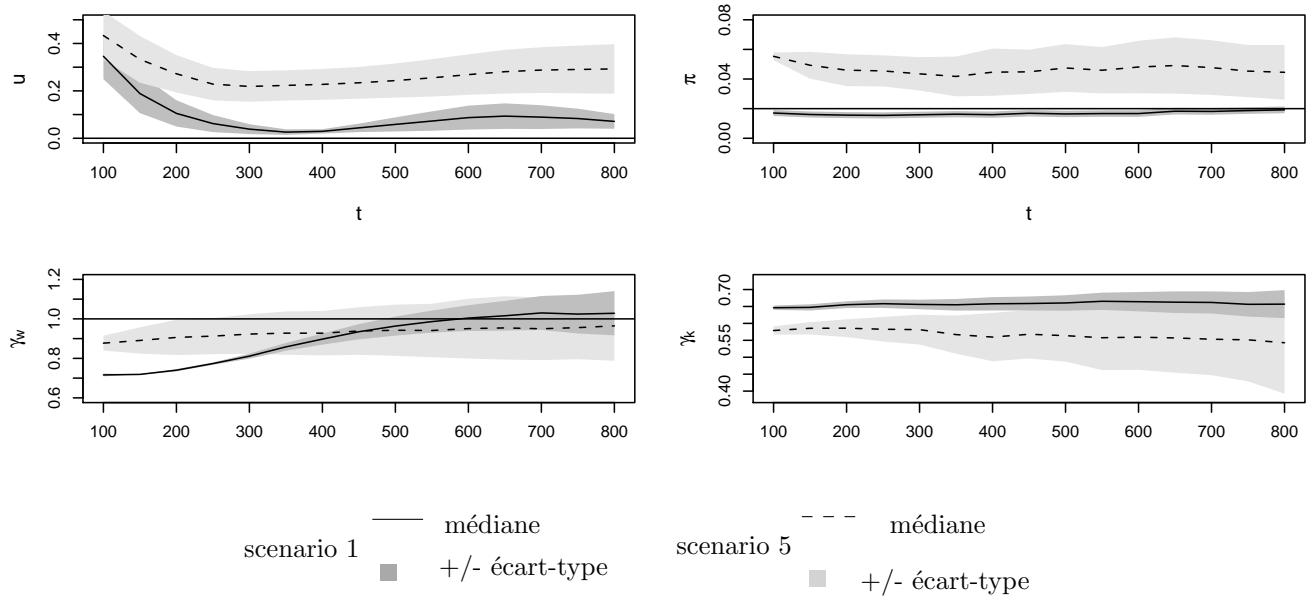


FIGURE 3.19 – Dynamique du modèle dans les scénarios 1 et 5 dans l’expérience 8 parmi l’ensemble des 20 réplications.

L’expérience 8 a été choisie pour illustrer la dynamique du modèle car les valeurs des paramètres sont proches de leurs valeurs moyennes sur le domaine expérimental (cf. tableau C.1 en annexeI).

scenario d’ancrage des anticipations : dès que  $\phi_\pi > 0.8$  et  $\phi_u > 0.36$ , les deux objectifs réagissent négativement à la règle de politique monétaire. Au contraire, en l’absence d’une cible crédible, seulement une réaction agressive à l’inflation associée à une forte réaction au chômage permet de diminuer l’écart d’inflation. Intuitivement, on peut imaginer que cette intensité dans la réaction est nécessaire pour éliminer des sentiers instables déflationnistes ou inflationnistes créés par des anticipations purement rétrospectives. Cependant, cette politique contribue à augmenter le taux de chômage. Les tests de corrélation reportés au tableau 3.5 confirment clairement cet élément. En effet, il n’y a pas d’arbitrage entre les deux objectifs dans le scenario 1 : ils sont positivement et significativement corrélés. Au contraire, une corrélation négative entre les deux objectifs émerge dans le scenario 5.

Un point reste intéressant à mentionner. Dans le scenario 1, des réactions agressives de la politique monétaire stabilisent mieux l’économie mais le principe de Taylor (*i.e.* la condition  $\phi_\pi > 1$ ) n’émerge pas comme un prérequis. Ce constat peut être relié à deux types de littérature. La première concerne les recherches sur les règles de politique monétaire robustes en présence d’incertitude, en particulier d’incertitude portant sur le modèle sous-jacent de l’économie et les canaux de transmission de la politique monétaire. Cette littérature conclut que les règles robustes sont des règles agressives, tant envers l’écart d’inflation qu’envers l’écart de production (voir notamment Tetlow & von zur Muehlen (2001)). Dans notre modèle, la banque centrale est clairement confrontée à ce type d’incertitude,

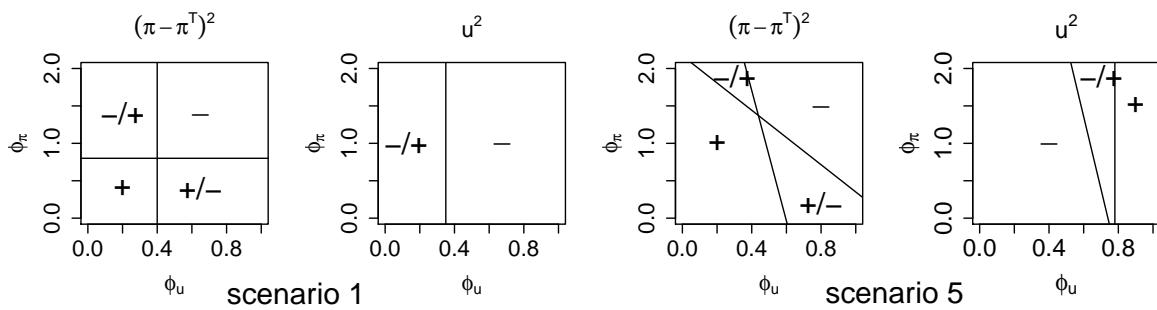


FIGURE 3.20 – Signes des dérivées estimées (basés sur les coefficients estimés significatifs à 10%, de la régression quadratique, cf. tableau C.6) de  $(\pi - \pi^T)^2$  et  $u^2$  par rapport à  $\phi_\pi$  et  $\phi_u$ .

Nous explicitons les couples  $(\phi_\pi, \phi_u)$  qui ont un effet négatif ou positif sur les objectifs de la banque centrale. Lorsque les paramètres de la règle exercent le même effet à la fois sur l'inflation et le chômage (que ce soit négatif, signalé par "-" ou positif, indiqué par "+"), la banque centrale ne fait face à aucun arbitrage entre les deux objectifs et la conduite de la politique monétaire est ainsi simplifiée. Si certains couples de coefficients ont un effet négatif sur un objectif mais contribue à augmenter le second ("-/+") indique que la dérivée est négative par rapport à  $\phi_\pi$  mais positive par rapport à  $\phi_u$  et "+/-" l'inverse), la banque centrale fait face à un arbitrage entre les deux objectifs. Dans ce cas, elle stabilise un objectif au détriment de l'autre, ce qui rend plus compliquée la conduite de la politique monétaire.

comme il a été explicité au chapitre précédent et notre résultat rejoint cette conclusion. Nous revenons aussi sur cette littérature dans le chapitre suivant. La seconde littérature étudie la dynamique du modèle NK, dans lequel le principe de Taylor est une condition majeure. En effet, deux questions sont primordiales. D'une part, sous l'hypothèse d'anticipations rationnelles, le modèle NK de base (tel qu'il est présenté notamment au chapitre 2) est dit déterminé, i.e. converge vers un sentier d'équilibre stationnaire unique compatible avec les objectifs de la politique monétaire dès que  $\phi_\pi$  est suffisamment fort, typiquement supérieur à l'unité (voir Woodford (2003b)). Il s'agit du principe de Taylor. D'autre part, Bullard & Mitra (2002) montrent que le principe de Taylor est une condition nécessaire et suffisante pour que l'équilibre unique soit "apprenable" (*learnable*) avec un apprentissage par les moindres carrés, i.e. pour que les croyances des agents finissent par coïncider avec le vrai processus qui dirige la dynamique économique (ce que l'on appelle la loi du mouvement, *law of motion*). Dans le cadre à base d'agents, nous trouvons que le principe de Taylor n'est pas discriminant, ce qui suggère que la banque centrale peut stabiliser l'inflation et le chômage avec des valeurs plus faibles de ce coefficient. Ce résultat reprend des conclusions précédemment établies dans plusieurs contributions, qui mettent en question l'importance de ce principe dans des environnements d'apprentissage autres que l'apprentissage économétrique. Dans la version linéarisée du modèle NK, Arifovic et al. (2012) évaluent dans quelle mesure le système peut converger vers l'équilibre en anticipations rationnelles dans un modèle où l'apprentissage est mis en place par un mécanisme de reproduction sociale, mo-

délisé par un algorithme génétique. Ils concluent que c'est généralement le cas, même si le principe de Taylor n'est pas respecté. Dans un modèle à base d'agents, dans lequel la banque centrale choisit les paramètres de la règle de politique monétaire grâce à un algorithme génétique qui en évalue les performances, Delli Gatti et al. (2005) montrent aussi que le principe de Taylor n'émerge pas comme un principe sélectionné par ce mécanisme évolutionnaire. Dans des expériences numériques dans le modèle NK de base, Lipinska & Yates (2010) concluent également que les performances de l'économie sont pratiquement invariantes aux types de règles retenus dès lors que le signal de la banque centrale sur la cible d'inflation est très précis et crédible, ce qui est le cas par définition dans le scenario 1.

En résumé, nous obtenons la proposition suivante :

**Proposition 6** *Lorsque les anticipations sont bien ancrées sur la cible d'inflation des autorités monétaires, la conduite de la politique monétaire est facilitée et la banque centrale ne fait pas face à un arbitrage entre son objectif d'inflation et celui d'emploi. En particulier, le principe de Taylor n'apparaît pas comme discriminant, bien que des réactions agressives aux deux objectifs semblent mieux stabiliser l'économie.*

### III.3 Conséquences d'une cible d'inflation bruitée

Les effets d'une cible non parfaitement communiquée sont étudiés grâce aux scenarii 2 et 3, mais sous différentes formes. En effet, nous supposons un seul tirage aléatoire dans le scenario 2 avec un bruit  $\sigma_\xi$  autour de la vraie cible d'inflation et les ménages partagent tous la même anticipation bruitée. Les anticipations d'inflation sont alors homogènes mais plus le bruit  $\sigma_\xi$  est fort, plus ces anticipations peuvent se trouver éloignées de la cible. Dans le scenario 3, chaque ménage tire sa propre anticipation d'inflation autour de la vraie cible avec un bruit  $\frac{\sigma_\xi}{n}$ , de sorte que l'anticipation d'inflation moyenne est égale à la cible mais les anticipations d'inflation sont hétérogènes. Dans ce cas, plus le bruit  $\frac{\sigma_\xi}{n}$  est fort, plus les anticipations individuelles sont dispersées autour de la cible et plus elles sont hétérogènes.

Dans les deux cas, la communication imparfaite de la cible introduit du bruit dans la dynamique du modèle. C'est en effet ce qui ressort clairement des résultats des simulations. Le bruit dans les anticipations d'inflation ajoute de la variabilité dans les stratégies des agents et ainsi accentue l'hétérogénéité des comportements des agents qui ressortent du processus d'apprentissage. Cet effet peut expliquer la dégradation des performances macroéconomiques dans les scenarii 2 et 3. Certes, l'inflation est en moyenne plus proche de la cible dans le scenario 3 que dans le scenario 1, probablement parce que les comportements d'indexation moyens sont plus proches de l'unité mais l'inflation est plus volatile dans le scenario 3. De plus, le taux de chômage y est à la fois supérieur et plus volatile. Dans

le scenario 2, les résultats macroéconomiques sont pires que dans le scenario de référence, que ce soit en niveau ou en termes de volatilité. Ils sont aussi moins satisfaisants que dans le scenario 3 : des tests de Student menés sur les deux échantillons conduisent à rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des écarts d'inflation et des taux de chômage dans les scenarii 2 et 3 contre l'hypothèse alternative d'un écart d'inflation plus marqué ( $t\text{-stat}=7.9$ ,  $p\text{-value}=1\text{e-}15$ ) et d'un taux de chômage plus élevé ( $t\text{-stat}=8.6$ ,  $p\text{-value}<2.2\text{e-}16$ ) dans le scenario 2.

L'analyse économétrique donne d'autres éléments de comparaison. Lorsque la cible est imparfaitement communiquée, que ce soit dans le scenario 2 ou 3, l'environnement d'apprentissage favorise globalement la convergence du modèle vers les objectifs de la politique monétaire mais son rôle est moins marqué que dans le scenario de référence. De plus, les chocs  $\sigma_{mutW}$  affectent à la fois la réalisation de l'objectif d'inflation et de chômage et à chaque fois avec un effet estimé plus fort que dans le scenario 1. Cet effet est particulièrement fort dans le scenario 2, ce qui peut expliquer les mauvaises performances en termes de stabilisation de l'inflation que l'on y observe. Néanmoins, la variabilité induite par l'apprentissage sur le comportement de substitution (i.e. les chocs  $\sigma_{mutK}$ ) n'a aucun effet significatif sur les objectifs de la banque centrale, tout comme dans le scenario de référence.

En outre, l'action de la politique monétaire sur les deux objectifs – que nous mesurons par les coefficients  $\phi_\pi$  et  $\phi_u$  de la règle de Taylor – est fortement perturbée. Dans le scenario 2, seule une réaction modérée à l'inflation ( $\phi_\pi < 1.5$ ) parvient à exercer un effet négatif sur l'inflation alors que la politique monétaire n'affecte pas par ailleurs le taux de chômage. Nous remarquons que les coefficients moyens  $\gamma_k$  sont particulièrement faibles dans ce scenario. Comme ces stratégies établissent la réponse de la demande aux changements du taux d'intérêt (cf. équations (2.90) et (2.91), page 107), le canal de la consommation est moins efficace dans le scenario 2 que dans le premier et ceci peut expliquer l'inefficacité de la politique monétaire sur l'emploi. Là encore, le principe de Taylor n'émerge pas comme une propriété désirable de la règle de politique monétaire. Dans une version simulée du modèle NK, Fukac (2008) obtient une conclusion similaire : si la banque centrale et les agents privés ont des anticipations d'inflation divergentes, ceci crée une divergence entre le taux d'intérêt réel que les agents anticipent, qui déterminent l'évolution de la demande, et le taux d'intérêt réel que la banque centrale a l'intention de fixer. Dans ce cas, la banque centrale ne doit pas réagir trop brutalement aux déviations de l'inflation par rapport à sa cible, pour ne pas amplifier les effets de cette divergence sur la volatilité macroéconomique.

La politique monétaire a une influence plus forte sur l'emploi dans le scenario 3 : dès que  $\phi_u > 0.5$ , le taux de chômage diminue si la banque centrale réagit plus fortement. Cependant, cette politique vient au détriment de la stabilisation de l'inflation.

Ces résultats peuvent être rapprochés du débat sur les effets potentiellement néfastes de la transparence dans la conduite de la politique monétaire (cf. sous-section II, au chapitre 1). Les contributions telles que celles de Morris & Shin (2002) ou de Ueda (2010) montrent que les agents privés sont susceptibles de se focaliser de manière excessive sur l’information publique pour former leurs propres anticipations. Dans le cas de la politique monétaire, cela signifie qu’ils risquent de totalement se reposer sur les annonces de la banque centrale pour anticiper l’inflation. En conséquence, si l’information disséminée par la banque centrale est bruitée, il y a un risque que les effets de ce bruit public soient amplifiés et que les performances macroéconomiques soient dégradées. En particulier, i) si l’information publique est très imprécise en comparaison de l’information privée dont disposent les agents (Woodford (2005) et Svensson (2007), entre autres) ou ii) si les agents privés ne sont pas capables d’évaluer correctement le bruit dans l’information publique (Dale et al. (2011)), la fourniture d’informations publiques peut être coûteuse en termes de bien-être. Si l’on interprète le bruit commun  $\xi$  dans le scenario 2 comme le bruit du signal public et les bruits individuels  $\xi_i/n$  dans le scenario 3 comme le bruit des signaux privés, nos résultats confirment ces éléments. i) L’instabilité macroéconomique est pire dans le cas où la cible annoncée est fortement imprécise que dans le cas où les individus forment des anticipations d’inflation sur la base de signaux privés mais en moyenne plus proches de la vraie cible. ii) Dans le scenario 2, les agents se reposent complètement sur l’information de la banque centrale ( $\chi = 1$ ) et n’intègrent pas le fait que cette information puisse être en réalité imparfaite. Néanmoins, ce résultat tient peut-être à la spécification des erreurs de perception de la cible dans les scénarios 2 et 3. En effet, cette spécification est la même que celle retenue par Morris & Shin (2002). Les erreurs individuelles sont à somme nulle, dans le sens où la cible perçue *en moyenne* par les agents dans le scenario 3 est égale à la vraie cible, alors que l’erreur publique perdure au niveau agrégé dans le scenario 2, puisque la cible perçue en moyenne correspond à une cible bruitée. Certains auteurs, comme Demertzis (2011) ont pointé que l’effet asymétrique au niveau agrégé des erreurs publique et privées pourrait être le ressort du résultat de Morris & Shin (2002), relativisant ainsi la généralité de ce résultat.

En conclusion, nous obtenons la proposition suivante :

**Proposition 7** *La communication imparfaite peut être associée à deux configurations concernant les anticipations d’inflation :*

1. *Une hétérogénéité parmi les anticipations d’inflation des ménages, i.e. un manque de coordination entre les individus.*
2. *Un mauvais ancrage des anticipations d’inflation (dans le sens de la coordination des anticipations sur un point qui diverge de l’objectif de la banque centrale) i.e. un manque de coordination entre la banque centrale et les individus.*

*Les deux situations donnent lieu à des comportements des agents plus hétérogènes. En conséquence, ceci crée de l'instabilité macroéconomique et restreint l'action de la politique monétaire sur l'inflation et le chômage. Néanmoins, il semble que la coordination des anticipations sur une cible fortement bruitée détériore davantage les performances macroéconomiques qu'un manque de coordination entre les agents.*

Nous nous tournons maintenant sur la question de la crédibilité de la cible d'inflation annoncée par la banque centrale.

### III.4 Conséquences d'un manque de crédibilité de la cible d'inflation

Nous comparons maintenant les résultats du scenario 4 (lorsque la crédibilité de la cible d'inflation n'est que partielle) et ceux du scenario 5 (lorsque la crédibilité de la cible est nulle) aux résultats du scenario de référence. Il ressort très clairement des statistiques descriptives (cf. tableau 3.5, page 3.5) que moins la cible d'inflation est crédible, plus l'inflation et le taux de chômage sont éloignés en moyenne de leurs valeurs-cibles et plus ces variables sont volatiles. Comme nous l'avons déjà mentionné à la sous-section III.2, le dernier scenario, caractérisé par l'absence d'une cible d'inflation crédible, affiche les plus mauvaises performances macroéconomiques.

En revanche, il est surprenant de remarquer que dans le scenario 4, l'hétérogénéité des comportements est plus forte que dans le scenario 5, à la fois en ce qui concerne les comportements d'indexation et les stratégies de substitution, alors que les performances y sont plus satisfaisantes. C'est très clair s'agissant de l'écart d'inflation. Ceci indique que c'est l'ancrage (au moins partiel) des anticipations sur la cible d'inflation qui est le déterminant fondamental de la stabilité macroéconomique. Ce résultat provient de la façon dont les anticipations sont formées en l'absence d'une cible crédible : les agents se fondent également sur la tendance passée du taux d'inflation et les anticipations d'inflation sont pour partie guidées de manière endogène par l'inflation passée. Dans ces conditions, les anticipations peuvent se désancker de l'objectif de la banque centrale. Un mécanisme auto-réalisateur se met en place, et d'autant plus que l'environnement d'apprentissage est volatile (*i.e.* les chocs  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$  sont forts). Dans le modèle, comme les scenarii d'anticipations sont fixés de manière exogène, la politique monétaire ne peut influencer la dynamique des anticipations. Pour renverser la situation, elle ne peut que ramener la dynamique effective de l'inflation près de sa cible.

Cependant, l'efficacité de la règle de politique monétaire est compromise dans le scenario 4 et surtout dans le 5, comme le montrent les résultats de l'analyse économétrique (cf. tableau C.6, en

annexe IV). En effet, la variabilité sur l’apprentissage des stratégies  $\gamma_w$  affecte très fortement la dynamique inflationniste : les anticipations étant fondées sur la dynamique effective de l’inflation, la variabilité dans les stratégies d’indexation crée de la variabilité dans le taux d’inflation. De plus, de faibles valeurs de  $\phi_\pi$  and  $\phi_x$  tendent à réduire l’écart d’inflation, alors que ce sont les fortes valeurs de ces coefficients qui permettent de diminuer le taux de chômage. La banque centrale fait alors face à un arbitrage entre ses deux objectifs. Cela est confirmé par les résultats reportés au tableau 3.5, où une corrélation négative et très significative entre les deux objectifs est relevée dans le scenario 4. Cette corrélation est encore plus forte dans le scenario 5, comme il a été discuté plus haut. Nous concluons ainsi que des anticipations d’inflation en partie guidées par l’inflation effective perturbent le pouvoir stabilisateur de la politique monétaire et obtenons la proposition suivante :

**Proposition 8** *La crédibilité, mesurée comme le degré d’ancrage des anticipations d’inflation privées sur la cible annoncée par la banque centrale, apparaît être le déterminant primordial du succès de la politique monétaire, à la fois sur le plan de la stabilisation du chômage et sur celui de la stabilisation de l’inflation. Une crédibilité imparfaite produit des anticipations en partie guidées par l’inflation effective et ainsi désancrées de l’objectif des autorités monétaires, ce qui entrave la capacité de la banque centrale à réagir aux chocs affectant l’économie et crée un arbitrage entre ses deux objectifs.*

L’importance de la crédibilité de la cible d’inflation a déjà été pointée dans de nombreuses contributions. En particulier, De Grauwe (2011) montre comment la banque centrale peut améliorer l’arbitrage auquel elle fait face entre ses deux objectifs en renforçant la crédibilité de sa cible d’inflation lorsque les anticipations des agents résultent d’heuristiques.

Pour finir, les graphiques C.5 en annexe IV et les pertes en bien-être calculées au tableau 3.6 confirment les trois propositions établies dans cette sous-section. Nous montrons l’évolution, sur les 800 périodes de simulation, du bien-être agrégé (calculé comme la somme des utilités individuelles des  $n$  ménages) dans chacun des 5 scenarii. Il est très clair que le scenario de référence affiche de meilleures performances que les 4 autres : le bien-être agrégé montre une tendance fortement croissante et se stabilise à un niveau élevé. C’est un signe évident d’apprentissage dans le modèle. Les scenarii 2, 3 et 4 montrent aussi une tendance croissante du bien-être. Cependant, une plus forte variabilité demeure à l’issue des 800 périodes, en particulier dans les scenarii 2 et 4. Le dernier scenario affiche les pires performances, ce qui est très cohérent avec les forts taux de chômage que l’on y observe en moyenne. Les pertes en bien-être représentent le pourcentage de consommation que les ménages perdent dans les scenarii 2, 3, 4 et 5, en comparaison du scenario de référence, lorsque les anticipations sont parfaitement ancrées. Ces résultats vont dans le sens de l’analyse qui a été développée dans cette sous-section.

benchmark	scenario 2	scenario 3	scenario 4	scenario 5
scenario 1	0.0416	0.0211	0.0576	0.2252

Tableau 3.6 – Pertes en bien-être associées à chaque scenario en comparaison du scenario de référence (scenario 1).

Lucas (2003) établit que le gain en bien-être à un changement de politique qui mène de l'état A vers l'état B est donné par  $\lambda$  tel que  $u((1 + \lambda)c_A) = u(c_B)$ , où  $c_A$  et  $c_B$  représentent la consommation de bien de l'agent représentatif sous l'état A et B et  $u(c_A) < u(c_B)$ .  $\lambda$  est exprimé en termes d'unités de pourcentage de tous les biens de consommation disponibles dans l'économie. De manière symétrique, par exemple, nous interprétons la perte en bien-être associée à une crédibilité partielle comme  $\lambda$ , où  $\lambda$  vérifie  $u(c_1) = u((1 - \lambda)c_4)$  et  $c_1$  et  $c_4$  sont les consommations médianes (en unités de bien) observées à la fin de l'ensemble des runs dans les scenarii 1 et 4 (*i.e.* en  $T = 800$ ). Dans ce cas, le manque de crédibilité conduit à une chute de 5.76% de la consommation médiane de bien dans le modèle.

Cette sous-section nous a permis de mettre en lumière deux éléments. D'une part, nous avons pu isoler l'effet de l'apprentissage sur les performances d'un régime de ciblage de l'inflation parfaitement clair et crédible grâce au scenario 1. Cette modélisation correspond très bien à la description d'un régime de ciblage de l'inflation comme d'un "*framework designed for a world of learning*" (King (2005)). D'autre part, la définition des scenarii 2 à 5 nous a permis d'évaluer comment le désancrage des anticipations, que ce soit du fait d'une communication de la cible ou d'une crédibilité imparfaite des autorités monétaires, ajoute de la volatilité macroéconomique, en sus de la variabilité structurelle induite par le processus d'apprentissage des agents. L'analyse de ces deux éléments démontre que les interactions entre le mécanisme d'apprentissage et les caractéristiques du régime de ciblage de l'inflation sont cruciales pour les performances de ce régime. Les résultats mis en lumière dans cette dernière sous-section sont tout à fait en phase avec ceux établis par la littérature récente et les débats qu'elle soulève, alors que nous envisageons un environnement plus fortement structuré par l'apprentissage.

## Conclusion

Des analyses qui ont été menées dans les deux premières sections de ce chapitre, nous pouvons tirer la conclusion générale que le modèle minimal qui a été développé au chapitre précédent peut être considéré comme *validé pour notre question de recherche* : il reproduit une économie dont l’ordre de grandeurs des variables agrégées émergentes est réaliste et les canaux de transmission de la politique monétaire, que ce soit par le taux d’intérêt sur la demande et surtout par les anticipations privées, fonctionnent correctement. La première question est celle de l’initialisation des paramètres du modèle. En effet, il s’agit d’une question épineuse mais cruciale à l’obtention de résultats cohérents. Nous avons ainsi identifié les configurations de paramètres qui permettent au modèle de développer une économie viable et nous avons pu les justifier en référence à la littérature académique existante. L’analyse de sensibilité approfondie qui a suivi nous a permis de détailler le fonctionnement du modèle et d’établir des valeurs auxquelles fixer les paramètres structurels du modèle pour concentrer l’analyse sur notre question de recherche : les interactions entre politique monétaire, apprentissage et anticipations. Un modèle minimal parcimonieux a ainsi été obtenu.

La dernière section a présenté une étude comparative de différents scenarii d’anticipations d’inflation, qui constitue la première étape de l’analyse de notre question de recherche. Cet exercice nous a permis d’évaluer les conséquences de deux dimensions majeures du ciblage de l’inflation dans son objectif d’ancrage des anticipations d’inflation privées : la précision de la communication de l’objectif ciblé et la crédibilité de cet objectif. Nous avons pu isoler la variabilité induite dans le modèle par la dynamique d’anticipations d’inflation lorsque celles-ci se trouvent désancrées de l’objectif de la banque centrale, soit en raison de bruit dans la transmission de la cible aux ménages, soit en raison d’une crédibilité seulement partielle des autorités monétaires. Nos résultats s’inscrivent de manière intéressante dans les débats soulevés par la littérature macroéconomique.

La dynamique des anticipations d’inflation a été spécifiée de manière exogène jusqu’à ce point du travail de thèse. Le chapitre suivant va maintenant spécifier des mécanismes de formation endogène des anticipations, mécanismes que la banque centrale pourra en retour influencer, soit par ses actions soit par sa communication. Ce cadre d’analyse doit permettre d’étayer les liens entre les différents ingrédients de notre modèle à savoir : l’apprentissage induit par le comportement procédural des agents, l’incertitude radicale en résultant, la communication de la banque centrale, la règle de politique monétaire et les performances macroéconomiques. Différents types de dispositifs peuvent être envisagés dans le modèle pour rendre compte du mécanisme de formation des anticipations des agents. Dans le chapitre suivant, nous envisageons d’abord un mécanisme de révision des croyances dans l’esprit

de Demertzis & Viegi (2008, 2009). Nous nous tournons ensuite vers un mécanisme plus sophistiqué d'apprentissage individuel dérivé des réseaux de neurones artificiels, qui permet de considérer non seulement l'annonce de la cible, mais une politique de transparence plus large de la part de la banque centrale (en particulier en incluant l'annonce des projections internes de celle-ci).



## CHAPITRE 4

# Dynamique des anticipations, apprentissage et ciblage de l'inflation

---

## Sommaire

---

Introduction . . . . .	169
I      La cible d'inflation comme un point focal . . . . .	170
I.1    Intégrer la cible dans le mécanisme d'anticipation d'inflation . . . . .	171
I.2    Ciblage <i>versus</i> non-ciblage de l'inflation : performances comparées . . . . .	177
I.3    Résultats complémentaires : différents degrés de transparence de la cible	193
II     La communication dans le modèle mental des agents . . . . .	198
II.1   L'apprentissage par un modèle mental . . . . .	198
II.2   L'intégration des réseaux de neurones au modèle minimal . . . . .	201
II.3   Transparence et performances macroéconomiques . . . . .	210
Conclusion . . . . .	232

---

## Introduction

LE CHAPITRE précédent a amorcé l'analyse des interactions entre anticipations d'inflation, politique monétaire et performances macroéconomiques dans le modèle à base d'agents dit minimal, – *i.e.* impliquant un jeu de paramètres ainsi qu'un ensemble d'hypothèses minimaux – obtenu à l'issue du processus de validation du modèle. Cette première analyse a été menée *pour une configuration donnée des anticipations d'inflation des ménages*. Il en ressort notamment que l'ancrage durable de ces anticipations sur la cible des autorités monétaires permet de faciliter la stabilisation macroéconomique et que le désancrage de ces anticipations est susceptible de perturber fortement la conduite de la politique monétaire. Une question se pose alors naturellement : comment la banque centrale peut-elle produire et faire perdurer une situation dans laquelle les anticipations d'inflation sont parfaitement alignées sur son objectif de croissance des prix ? En particulier, un régime de ciblage de l'inflation peut-il y contribuer ? Si oui, à quelles conditions ?

Pour répondre à ces interrogations, nous enrichissons le modèle minimal en spécifiant une dynamique des anticipations d'inflation. Nous considérons successivement deux éléments constitutifs de ce régime, à la manière de Faust & Henderson (2004) : "the two core requirements of IT are 1) an explicit long-run inflation goal and 2) a strong commitment to transparency regarding all goals and aspects of policy".

La première partie de ce chapitre (section I) considère la réactivité des anticipations d'inflation en fonction des performances de politique monétaire. La crédibilité de la cible d'inflation de la banque centrale est l'élément central de cette modélisation : la cible a un double rôle. D'une part, elle sert de *point de référence* au regard duquel les agents évaluent les performances de la politique monétaire en termes d'inflation, et jugent de la crédibilité de l'objectif de la banque centrale. D'autre part, si la cible est jugée crédible, elle sert de point focal sur lequel les anticipations des ménages peuvent potentiellement se coordonner. Pour représenter un tel mécanisme, nous adaptons le mécanisme de formation des anticipations de Demertzis & Vieggi (2008, 2009), qui est un mécanisme purement adaptatif et rétrospectif, à notre modèle à base d'agents. L'approche à base d'agents nous permet de prolonger leurs résultats dans un contexte d'apprentissage et de rationalité limitée, en prenant explicitement en compte l'*hétérogénéité* des agents et de leurs anticipations ainsi qu'un environnement d'*incertitude radicale*.

La seconde partie (section II) présente une modélisation des anticipations plus riche : elle tente d'inclure non seulement l'annonce de la cible, mais aussi la stratégie de communication globale de la banque centrale dans l'ensemble d'informations dont disposent les agents pour former leurs anticipations d'inflation. Ceci est rendu possible en dotant chaque agent d'un modèle mental décrivant

la représentation qu'il se fait des relations entre les signaux de la banque centrale et la dynamique inflationniste résultante. Une telle représentation évolue ensuite sur la base des nouvelles informations que les agents acquièrent chaque période. Cette forme d'apprentissage est intégrée au modèle minimal du chapitre précédent en ayant recours à un réseau de neurones artificiel<sup>1</sup>. Cette spécification nous permet de rendre compte de la capacité des agents à généraliser et à former des anticipations prospectives.

Les politiques monétaires optimales, à la fois en termes de réactivité de la règle et de contenu de la communication, ainsi que les performances obtenues sont établies dans les deux cadres d'analyse. Ce rapprochement nous permet de montrer l'importance de la spécification du mécanisme d'anticipations pour les conclusions tirées de l'analyse du modèle.

## I La cible d'inflation comme un point focal

Nous choisissons comme point de départ la contribution de Demertzis & Vieg (2009). En effet, elle nous semble particulièrement en phase avec la question du rôle de l'annonce explicite de la cible d'inflation dans l'ancrage des anticipations privées et par là, dans la stabilisation macroéconomique et ce notamment à trois égards : cette contribution i) utilise un cadre dans lequel les agents sont engagés dans un processus d'apprentissage et reçoivent une information imparfaite pour former leurs anticipations ; ii) tient compte de manière explicite du double rôle de la cible d'inflation à la fois comme un point de référence pour l'évaluation des performances de politique monétaire et comme un point focal pour coordonner les anticipations des agents et iii) modélise la manière dont crédibilité et succès de la banque centrale interagissent pour permettre l'amélioration de la stabilisation de l'économie en présence de chocs.

Cependant, le cadre de Demertzis & Vieg (2009) repose sur l'hypothèse que le processus de l'inflation se résume à une distribution de probabilité normale, dont la moyenne et la variance sont parfaitement connues des agents et de la banque centrale. A cette condition, couplée à celle d'homogénéité des individus, les agents révisent leurs anticipations d'inflation selon une règle bayésienne. Dans le modèle à base d'agents, au contraire, les agents évoluent dans un contexte marqué par une *incertitude radicale*. Les agrégats macroéconomiques ne peuvent pas être décrits par des distributions de probabilité, dont les paramètres seraient connus ou estimés. Par ailleurs, les agents sont *hétérogènes* dans leurs stratégies et leur dotation et rien, *a priori*, ne permet de supposer qu'ils partagent les

---

1. Des applications de ce mode d'apprentissage dans des modèles macroéconomiques incluent notamment Salmon (1995), Cho & Sargent (1996, 1997), Heinemann (2000) et Yıldızoğlu et al. (2012). Ses caractéristiques et ses attraits sont discutés à la sous-section II.2 de ce chapitre.

mêmes anticipations d'inflation. Il nous faut alors adapter le mécanisme de formation des anticipations d'inflation utilisé par Demertzis & Viegi (2009) à l'approche à base d'agents pour tenir compte de ces deux ingrédients supplémentaires – incertitude radicale et hétérogénéité.

Nous décrivons maintenant le mécanisme retenu ainsi que ce qui distingue un régime de ciblage de l'inflation d'un régime de non-ciblage dans ce mécanisme. Les performances des deux régimes sont ensuite comparées dans différentes configurations de chocs.

## I.1 Intégrer la cible dans le mécanisme d'anticipation d'inflation des ménages

Le modèle de Demertzis & Viegi (2009) a été exposé à la sous-section III.1 du chapitre 1. Nous en rappelons ici les principales caractéristiques et intuitions, avant de décrire la manière dont nous les intégrons au modèle à base d'agents.

Un régime de ciblage de l'inflation se définit comme une situation où la cible d'inflation ainsi que le rayon de tolérance autour de celle-ci font partie de l'ensemble d'informations des agents. Sous un tel régime, les agents ont le choix entre anticiper une inflation égale à la cible, ou se servir des informations publiques et privées disponibles pour former leur anticipation selon le modèle de Morris & Shin (2002). Ce choix dépend de la crédibilité de la cible d'inflation des autorités monétaires : la cible est un *point de référence* qui permet d'évaluer les performances de la banque centrale en matière d'inflation, et ainsi d'établir sa crédibilité. A condition que cette crédibilité soit suffisante, la cible sert alors de *point focal* pour permettre l'ancrage des anticipations. Ainsi, la crédibilité de la banque centrale se définit explicitement comme le *degré d'ancrage* des anticipations d'inflation sur la cible. Notons que les anticipations d'inflation sont *hétérogènes* dans le cadre de Demertzis & Viegi (2009), dans la mesure où les agents peuvent utiliser un signal privé pour former leurs anticipations, mais ces signaux privés se compensent au niveau agrégé. Cependant, le choix d'utiliser l'information privée et publique disponible ou la cible est identique pour tous les agents, si bien que la coordination sur la cible est atteinte dès qu'un certain seuil de crédibilité est atteint (Demertzis & Viegi (2008)).

Puisque les anticipations d'inflation jouent en retour sur la dynamique inflationniste (via le canal des anticipations), une *boucle* entre les performances passées de la banque centrale et sa crédibilité est susceptible de s'enclencher : plus l'objectif d'inflation a été atteint un grand nombre de fois dans le passé, plus la banque centrale est crédible (*i.e.* plus les anticipations ont de chances de s'ancrer sur la cible) et par là, plus elle a de chances de réussir son objectif d'inflation dans les périodes à venir. En conséquence, une crédibilité plus forte améliore les performances de politique monétaire.

Un arbitrage existe cependant en choisissant la fourchette de tolérance autour de la cible : une fourchette large augmente les chances de succès de la banque centrale mais fournit un signal moins clair pour la coordination des anticipations.

Alternativement, un régime de non-ciblage est un régime dans lequel les agents ne connaissent pas la cible, et les agents forment nécessairement leur anticipation à partir de leurs informations privées et publiques selon le mécanisme de Morris & Shin (2002). Cependant, concernant cette spécification, les auteurs pointent eux-mêmes une limite à leur cadre d'analyse :

*In our analysis, the default monetary policy regime does not allow for credibility and success to feature in the game. In every period, the Central Bank and private agents decide on their action [...], without reviewing performance and credibility. The expectations formation process is therefore independent of past performance and by comparison, inflation targeting can only improve success. However, one could conceivably compare inflation targeting to other regimes that do allow for this credibility-success loop, but then defined less tightly. We could then compare how these alternative regimes affect a Central Bank's credibility in periods of adverse shocks. Our discussion on how the width of the band affects success is a clear indication that other less clear definitions might prove less harmful (although also less effective in providing a focal point).* (Demertzis & Vieggi (2009, p. 31))

Les auteurs mentionnent alors la possibilité de concevoir un régime de non-ciblage de l'inflation qui permette à la banque centrale d'exploiter la boucle crédibilité/succès mais de manière plus souple, notamment en présence de chocs. Dans ce cas, il serait possible que passer à un régime de ciblage de l'inflation puisse générer des résultats défavorables en terme de stabilisation macroéconomique. Nous souhaitons ainsi intégrer à notre modèle la possibilité que les anticipations des agents puissent être dépendantes des performances passées de la banque centrale même en régime de non-ciblage, et montrons dans la suite que la conjecture des auteurs reportée ci-dessus s'avère pertinente.

Nous détaillons maintenant la manière dont les deux régimes – ciblage et non-ciblage de l'inflation – sont modélisés et intégrés au modèle minimal en insistant sur le parallèle avec le modèle de Demertzis & Vieggi (2009).

Le modèle conceptuel exposé au chapitre 2 n'est pas modifié. En particulier, la banque centrale est dite en régime de ciblage de l'inflation flexible (au sens de Svensson (1997a)) dans la mesure où la règle de Taylor inclut un objectif d'emploi à côté de celui d'inflation. L'économie comporte  $n$  ménages indexés par  $i$  qui forment chacun leur propre anticipation d'inflation  $\pi_{i,t+1}^e$  à chaque période  $t$  pour la période suivante  $t+1$ . On suppose que les agents révisent leurs anticipations de manière adaptative, en prenant en compte les performances passées de la banque centrale en matière d'inflation. On suppose aussi qu'ils attribuent plus de poids aux observations passées récentes qu'aux plus anciennes<sup>2</sup>. Ainsi,

---

2. Ceci correspond très bien à la notion d'"apprentissage perpétuel" dans la littérature liant politique monétaire et apprentissage par les moindres carrés (voir en particulier Orphanides & Williams (2005, 2007)).

les agents prennent en compte un nombre fini de périodes passées, noté *window* (qui est identique pour tous les agents).

### I.1.1 Anticiper l'inflation en régime de ciblage de l'inflation

Dans un régime de ciblage de l'inflation, la banque centrale annonce sa cible d'inflation  $\pi^T$  ainsi que le rayon de tolérance autour de cette cible, noté  $+/-\zeta$ <sup>3</sup>. Les ménages considèrent les *window* dernières périodes et évaluent la politique monétaire en termes d'inflation en fonction de sa cible annoncée.

Si l'inflation courante  $\pi_t$  se trouve entre  $\pi^T - \zeta$  et  $\pi^T + \zeta$ , la cible est considérée comme atteinte. Si la cible a été atteinte  $x$  fois sur les *window* dernières périodes, la probabilité que la banque centrale atteigne son objectif d'inflation à la période suivante  $P_{target}$  est estimée par  $\frac{x}{window} \leq 1$ . Cette probabilité est une mesure de la crédibilité de la banque centrale très proche de celle retenue par Demertzis & Vieggi (2009)<sup>4</sup>.

A chaque période, nous obtenons alors les probabilités

$$\{P_{target}, 1 - P_{target}\}$$

correspondant au système complet d'événements pour la période suivante

$$\{ "atteindre la cible", "manquer la cible" \}$$

A partir de ces probabilités, nous construisons un mécanisme simple qui permet de déterminer la dynamique des anticipations dans le modèle. La figure 4.1 illustre son fonctionnement avec un exemple chiffré. Ainsi, à chaque période  $t$ , chaque ménage  $i$  :

i) avec une probabilité  $P_{target} \leq 1$ , tire une anticipation d'inflation dans une loi uniforme centrée sur l'objectif annoncé, i.e. :

$$\pi_{i,t+1}^e \hookrightarrow \mathcal{U}(\pi^T - \zeta, \pi^T + \zeta) \quad (4.1)$$

et ii) avec une probabilité  $1 - P_{target}$ , fixe son anticipation d'inflation sur la base de l'inflation courante comme suit :  $\pi_{i,t+1}^e = \pi_t + \xi_i$ , avec  $\xi_i > 0$  un bruit issu d'une loi normale de moyenne nulle

---

3. Empiriquement, ce rayon traduit la prise en compte de l'incertitude, notamment sur la mesure de l'inflation, et des chocs éventuels, qui peuvent mettre à mal la stabilisation de l'inflation.

4. La seule différence est que, dans la contribution de Demertzis & Vieggi (2009), cette probabilité est révisée période par période par un mécanisme bayésien basé sur l'hypothèse que l'inflation suit une distribution normale dont la moyenne et la variance sont parfaitement connues des agents.

et de variance  $\sigma_\xi^2$ .

Dans le cas i), le ménage considère que l'objectif de la banque centrale est crédible : plus  $P_{target}$  est proche de 1, plus les agents ont de chances de tirer tous leur anticipation dans le même ensemble, centré sur la cible. La cible joue ainsi clairement un rôle de point focal sur lequel les anticipations des agents peuvent se coordonner. La boucle entre crédibilité et succès est ainsi susceptible d'émerger : plus la banque centrale atteint la cible, plus elle acquiert de la crédibilité et  $P_{target}$  augmente et plus les anticipations des agents ont de chances d'être proches de la cible. La phase de validation du modèle au chapitre 3 a montré que la conduite de la politique monétaire est facilitée et la dynamique macroéconomique plus stable si les anticipations des agents sont bien coordonnées sur l'objectif d'inflation de la banque centrale. Plus la banque centrale est crédible, plus elle a de chances de parvenir à son objectif d'inflation et de devenir encore davantage crédible (ou de conserver une crédibilité totale). Par ailleurs, les anticipations des ménages sont hétérogènes, mais sont d'autant plus homogènes et proches de la cible  $\pi^T$  que le rayon  $\zeta$  est petit (et que  $P_{target}$  est proche de 1). Si  $P_{target}$  est égale à 1, les ménages tirent tous leurs anticipations dans le même intervalle  $[\pi^T - \zeta, \pi^T + \zeta]$ . De plus, plus  $\zeta$  est petit, plus cet intervalle est réduit, et plus les anticipations des agents sont proches les unes des autres (et proches de la cible, qui est le centre de l'intervalle). Cependant, plus le rayon  $\zeta$  est large, plus la banque centrale a de chances d'avoir contenu l'inflation dans la fourchette annoncée et plus elle a de chances d'être crédible à l'avenir (i.e. plus la probabilité  $P_{target}$  est forte). Il peut donc y avoir un rôle ambigu de la fourchette de tolérance, tout comme dans le modèle de Demertzis & Vieggi (2009).

Dans le cas ii), l'établissement du taux d'inflation est basé sur l'inflation observée à la période courante  $\pi_t$  (voir De Grauwe (2011) pour un mécanisme similaire). Les anticipations peuvent ainsi se désancker de la cible et le processus inflationniste peut alors être conduit uniquement par les anticipations, qui deviennent auto-réalisatrices. Nous pensons que ce mécanisme montre très bien comment les anticipations d'inflation peuvent se désancker de l'objectif des autorités monétaires suite à des échecs successifs de la politique monétaire à stabiliser l'inflation, rendant la conduite subséquente de la politique monétaire bien plus délicate. Ce dispositif traduit également assez clairement le rôle des banques centrales en termes de "managers d'anticipations" (Woodford (2003b)).

Après avoir détaillé le rôle d'une cible d'inflation explicite dans le mécanisme de révision des anticipations d'inflation des agents, nous devons construire une situation dans laquelle les agents doivent former leurs anticipations sans connaître la cible d'inflation (régime de non-ciblage de l'inflation).

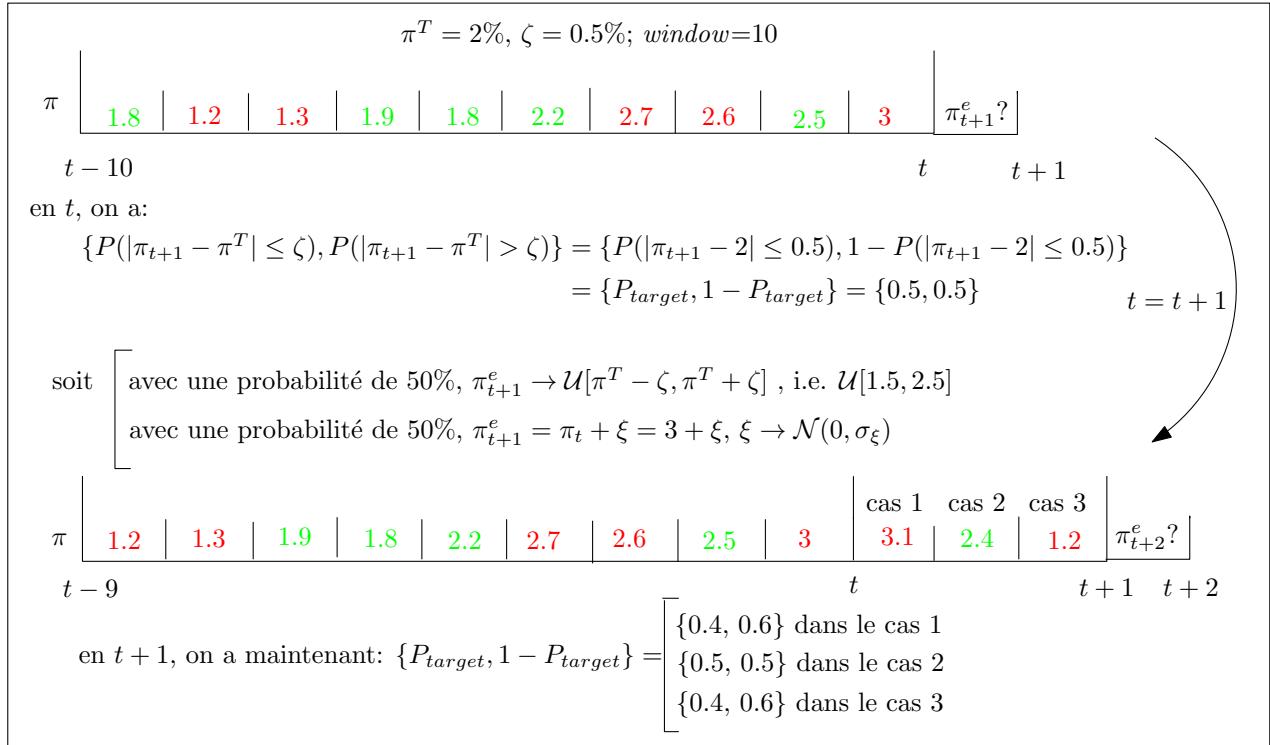


FIGURE 4.1 – Illustration du mécanisme de formation des anticipations d'inflation des ménages dans le cas d'un régime de ciblage de l'inflation – pour faciliter la lecture, les taux d'inflation sont en vert lorsqu'ils sont dans la fourchette annoncée par la banque centrale, en rouge sinon.

### I.1.2 Anticiper l'inflation sans la connaissance de la cible (régime de non-ciblage)

La différence fondamentale entre un régime de ciblage et un régime de non-ciblage de l'inflation réside dans l'absence de l'annonce d'une cible d'inflation explicite, ainsi que de la fourchette de tolérance qui peut lui être associée<sup>5</sup>. Nous avons envisagé deux solutions pour modéliser la manière dont les agents forment leurs anticipations d'inflation dans un tel régime :

- Supposer que les agents forment leurs anticipations d'inflation en utilisant un algorithme génétique, tout comme pour former leurs autres stratégies  $(\gamma_i^w, \gamma_i^k)$ .
- Utiliser un autre référentiel que la cible dans le mécanisme de révision des anticipations présenté ci-dessus au point I.1.1 : une cible bruitée ou la tendance passée du taux d'inflation.

Nous avons favorisé la seconde option par rapport à la première car elle permet de rester beaucoup plus proche du cadre retenu pour modéliser un régime de ciblage de l'inflation. Comparer sur cette base les performances des deux régimes semble alors plus pertinent. Plus précisément, dans le régime

5. Empiriquement, la distinction est plus subtile. En effet, la BCE revendique de ne pas être en ciblage de l'inflation, bien qu'elle ait une cible d'inflation officielle – 2% – dans la mesure où elle a également une cible de croissance des agrégats monétaires. Dans notre modèle, tout comme dans la contribution de Demertzis & Viegi (2009) ou celle de De Grauwe (2011), nous retenons comme seule différence l'existence d'une cible explicite ou non.

de non-ciblage, nous retenons comme référentiel la tendance passée du taux d'inflation sur les *window* dernières périodes, notée  $\tilde{\pi}_t$ , à la place de la cible (c'est la seule différence entre les deux régimes). La figure 4.2 illustre l'établissement des anticipations d'inflation dans un tel régime de non-ciblage, à l'aide du même exemple chiffré qu'à la figure 4.1 en régime de ciblage, dans le but de faciliter la comparaison entre les deux mécanismes.

Ce choix peut être motivé par trois arguments. Premièrement, considérer une cible bruitée reviendrait à ajouter aux problèmes de crédibilité de la cible un problème de clarté de l'annonce. Cette question a été traitée au chapitre précédent. Ici, nous sommes davantage focalisés sur la stratégie de communication de la banque centrale visant à conforter sa crédibilité et par là à améliorer ses performances en termes de stabilisation macroéconomique. Deuxièmement, considérer la tendance passée des taux d'inflation comme point de référence pour les agents permet de traduire de manière assez intuitive *le manque d'ancre* causé par l'absence d'un objectif explicite. Ceci peut être rapproché des travaux de Canzian (2009) et De Grauwe (2011) qui modélisent, dans le contexte de la politique monétaire, la notion Keynésienne de "*sentiment de marché*" : les anticipations d'inflation sont conduites par le "sentiment de marché" dans le sens où, en l'absence d'un point de référence explicite tel une cible, les agents tendent à devenir pessimistes lorsque le taux d'inflation est élevé et vice-versa. De plus, comme souligné dans les travaux de Roos & Schmidt (2012), la tendance passée des variables macroéconomiques est un élément déterminant dans la formation des anticipations lorsqu'il s'agit d'agents non-économistes, comme des ménages. C'est donc une hypothèse plausible.

Troisièmement, elle permet de compléter la limite pointée des travaux de Demertzis & Vieg (2009) à la section I.1.1. En effet, comme le point de référence pour l'évaluation de la politique monétaire correspond à la tendance passée d'inflation, il varie en fonction des performances passées de la banque centrale : une série d'échecs à maintenir l'inflation dans sa fourchette éloigne l'inflation moyenne donc le point d'ancre et de référence de la cible. Les anticipations des agents s'éloignent alors à leur tour de la cible, rendant d'autant plus difficile la réalisation de l'objectif d'inflation des autorités monétaires. A l'inverse, plus la banque centrale atteint son objectif, plus l'inflation moyenne et donc le point d'ancre et de référence restent proches de la cible et plus les agents forment des anticipations proches de celle-ci. Plus, en retour, la politique monétaire est facilitée et a de chances de réussir à stabiliser l'inflation : les performances passées et la crédibilité de la banque centrale<sup>6</sup> interagissent et contribuent à améliorer ou au contraire détériorer les performances de la banque centrale. Par exemple, une telle stratégie peut se concevoir si la banque centrale a des problèmes de communication, et préfère

6. La crédibilité de la banque centrale se définit exactement de la même manière que dans le régime de ciblage de l'inflation, à savoir par le degré d'ancre des anticipations sur la cible (cf. point 5) :  $P_{target} \equiv \frac{x}{window} \leq 1$ , avec  $x$  le nombre de fois où la cible a été contenue dans la fourchette (non-connue dans ce cas des agents) sur les *window* dernières périodes.

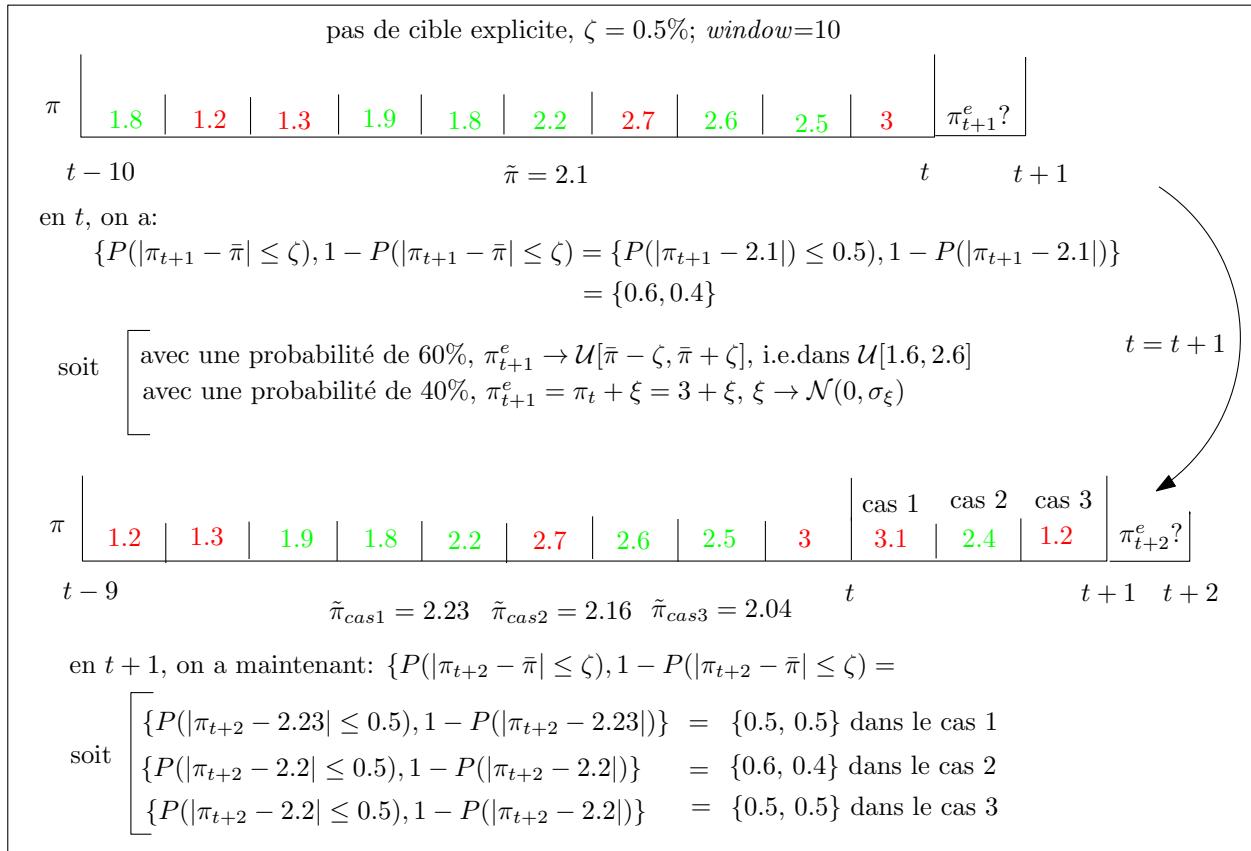


FIGURE 4.2 – Illustration du mécanisme de formation des anticipations d’inflation des ménages dans le cas d’un régime de non-ciblage de l’inflation – pour faciliter la lecture, les taux d’inflation sont en vert lorsqu’ils sont dans la moyenne plus ou moins le rayon, en rouge sinon.

être jugée sur ses actes.

Comme suggéré par Demertzis & Vieggi (2009), nous avons conçu un mécanisme en régime de non-ciblage de l’inflation qui permette cette boucle mais dans des conditions plus souples que lorsque la cible est annoncée, dans la mesure où le référentiel varie. Ceci ouvre davantage de possibilités quant aux résultats de la comparaison des performances des deux régimes. Il est notamment possible qu’un régime de ciblage de l’inflation puisse apporter, dans certaines conditions, des résultats plus médiocres en terme de stabilisation macroéconomique qu’un régime moins transparent. C’est ce que nous allons établir dans la suite de cette section.

## I.2 Ciblage *versus* non-ciblage de l’inflation : performances comparées

Nous présentons d’abord des résultats préliminaires fournissant une analyse de sensibilité du modèle sous les deux régimes – ciblage et non-ciblage de l’inflation.

### I.2.1 Résultats préliminaires

Une première batterie de simulations est lancée, dont le protocole est décrit ci-après (configuration 4). Nous visons deux objectifs : d'une part, évaluer la dynamique globale du modèle pour mettre en lumière les points qu'il serait par la suite intéressant de mettre davantage en avant et, d'autre part, obtenir une configuration du modèle impliquant un nombre restreint de paramètres pour "réduire les degrés de liberté du modèle" et ainsi affiner notre analyse.

**Protocole de simulation** Le tableau 4.1 reprend l'ensemble des paramètres du modèle (y compris ceux étudiés au chapitre précédent pour faciliter la compréhension), 15 au total et leurs valeurs correspondantes. Nous nous focalisons, dans cette section, sur les liens entre communication de la banque centrale, crédibilité de l'objectif de stabilité des prix et performances macroéconomiques. Tout comme dans la section 4 du chapitre 3, les paramètres structurels du modèle sont fixés aux valeurs de la littérature (Goodfriend & King (1997), Rotemberg & Woodford (1998), Woodford (2003b)) et les paramètres  $\bar{b}_0$  (la richesse initiale individuelle),  $\bar{k}$  and  $\underline{k}$  (les bornes de la propension à consommer) ainsi que  $\varepsilon$  (le taux d'apprentissage de la firme) sont fixés à des valeurs qui n'influencent pas significativement et de manière mécanique la dynamique du modèle. Nous fixons enfin la cible d'inflation à 2% puisque cette valeur correspond à la cible de la plupart des banques centrales des pays développés en ciblage de l'inflation. Dans la suite de l'analyse, nous envisageons néanmoins d'autres valeurs de la cible (cf. sous-sections I.2 et I.3).

Nous faisons varier les valeurs des 8 paramètres restants. Le plan d'expériences à 8 facteurs impliquant 33 points est donné en annexe I. Le rayon de tolérance autour de la cible est tiré dans un espace volontairement large pour tester la présence d'un arbitrage entre largeur de la fourchette et clarté du signal fourni. En outre, nous posons une hypothèse supplémentaire dans le but de limiter le nombre de tirages aléatoires et donc le bruit dans le modèle : la variance de  $\xi$ , décrivant la volatilité des anticipations des agents (dès lors qu'ils ne croient pas en la cible) est proportionnelle à la variance des chocs de prix, approximée dans le modèle par le paramètre  $\sigma_{mutW}$ <sup>7</sup>. Cette hypothèse s'interprète facilement : plus les chocs de prix sont de forte ampleur, plus il est probable que l'inflation se trouve d'autant plus éloignée de son objectif. On pose alors  $\sigma_\xi \equiv \frac{\sigma_{mutW}}{10}$ , où le facteur 10 est introduit pour des raisons d'échelle de grandeurs lors des tirages aléatoires.

---

7. Nous avons discuté au chapitre 2, sous-section III.5, de l'interprétation des chocs d'apprentissage  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$ . Ce dernier ayant un impact direct sur la variabilité de l'inflation *via* les effets dits de second-tour, nous le traduisons en terme de chocs sur les prix.

Paramètres	Non dans R-Project	Domaines de variation config. (4)	Domaines de variation config. (5) et (6)	Description	Source des valeurs
<i>Paramètres structurels de l'économie</i>					
$\alpha \in [0, 1]$	alpha	0.25	0.25	paramètre de rendements d'échelle	Woodford (2003b)
$\mu \geq 0$	mu	0.10	0.10	marge appliquée sur le coût marginal	Woodford (2003b)
$window \geq 1$	window <sup>a</sup>	[5, 40]	20	paramètre de retard	analyse de sensibilité (chap. 4., section 2.2.)
$b_0 \geq 0$	initWealth	10	10	richesse initiale individuelle	analyse de sensibilité (chap. 3)
<i>Paramètres de l'apprentissage des agents</i>					
$P_{init} \in ]0, 1]$	probLimit	[0.05, 0.25]	0.1	probabilité d'imitation de l'algorithme génétique	analyse de sensibilité (chap. 4., section 2.2.)
$P_{mut} \in ]0, 1]$	probMut	[0.01, 0.1]	0.02	probabilité de mutation de l'algorithme génétique	analyse de sensibilité (chap. 4., section 2.2.)
$\sigma_{mutK} > 0$	mutSpaceK	[0.05, 0.4]	{0.05; 0.4}	ampleur de l'incertitude sur le modèle	
$\sigma_{mutW} > 0$	mutSpaceW	[0.05, 0.4]	{0.05; 0.4}	chocs inflationnistes	
$\varepsilon > 0$	epsilon	0.01	0.01	taux d'ajustement de la demande de travail	analyse de sensibilité (cf. chap. 3)
<i>Paramètres de la politique monétaire</i>					
$\phi_\pi \geq 0$	coeffInflRate	[0, 2]	[0, 2]	coefficient de réaction à l'écart d'inflation	
$\phi_u \geq 0$	coeffUnemp	[0, 1]	[0, 1]	coefficient de réaction au taux de chômage	
$\pi^T \geq 0$	infTarget	0.02	{0.01; 0.02; 0.04}	cible d'inflation	pratique des banques centrales
$\zeta \geq 0$	range	[0.25, 2]%	[0.1; 1]%	rayon de tolérance	<i>idem</i> (voir, par exemple, Svensson (2010))
<i>Contraintes introduites sur le comportement des agents</i>					
$k \geq 0$	minCRate	0.5	0.5	taux de consommation minimal	analyse de sensibilité (chap. 3)
$k \geq 1$	maxCRate	1.5	1.5	taux de consommation maximal	analyse de sensibilité (chap. 3)

Tableau 4.1 – Ensemble des 15 paramètres du modèle augmenté des anticipations d'inflation des agents

a. Le degré de lissage des moyennes mobiles  $\rho$  est maintenant dérivé de la valeur de  $window$  puisque les deux paramètres traduisent le même effet. On pose  $\rho = 0.05^{\frac{1}{window}}$ , ce qui revient à dire que les observations antérieures à  $window$  périodes pèsent moins de 5% dans le calcul des agrégats par moyenne mobile.

Enfin, tout comme au chapitre précédent, nous initialisons les stratégies des agents comme suit :  $\gamma_{i,0}^k \sim U[0, 1]$ ,  $\gamma_{i,0}^w \sim U[0.5, 1.5]$ ,  $\forall i$  et  $H_0^d \sim \mathcal{U}[1, n]$ . On a  $n = 500$  ménages,  $T = 800$  périodes et le niveau de prix initial, les salaires nominaux désirés initiaux et les taux de consommation initiaux de chaque agent sont initialisés à un. De plus, on initialise les probabilités  $P_{target} = \frac{1}{3}$ . Comme le modèle n'est pas déterministe, chaque expérience est répétée 20 fois, soit 660 runs au total pour chacun des deux régimes.

Les performances de la banque centrale sont mesurées par une fonction de perte usuelle (voir par exemple Svensson (1999)) :

$$\mathcal{L}(\pi, u) = (\pi - \pi^T)^2 + u^2 \quad (4.2)$$

où le taux d'inflation  $\pi$  et le taux de chômage  $u$  sont évalués en prenant la moyenne des taux observés sur l'ensemble des périodes 100 à 800 pour chacun des runs<sup>8</sup>. Nous recueillons alors 660 observations de la fonction de perte.

Nous donnons des premiers éléments de comparaison des performances de la banque centrale dans les deux régimes (ciblage ou non). Nous portons une attention particulière au couple formé par la cible et la fourchette dans l'ancrage des anticipations d'inflation (cf. point 11 sous-section I.1).

**Déterminants des performances de la banque centrale** La figure 4.3 donne les principaux déterminants de la fonction de perte de la banque centrale dans la configuration 4. Un cas particulier est obtenu, dans les deux régimes, si le nombre d'observations de l'inflation utilisées par les agents pour évaluer les performances de la banque centrale et anticiper l'inflation est particulièrement faible (*window* n'excède pas 5 périodes). C'est le cas dans 3 des 33 configurations retenues. Dans ce cas, la valeur estimée de la perte est particulièrement forte, probablement parce que le mécanisme de formation des anticipations est trop réactif face à des changements dans le processus de l'inflation suite à la variabilité introduite dans le modèle par l'apprentissage des agents.

Hormis ce cas, le régime de ciblage couplé à un rayon relativement large (au moins 1%) mène aux meilleurs résultats. Les figures en annexe II nous renseignent sur le rôle de la fourchette dans un régime de ciblage de l'inflation, et dans un régime de non-ciblage. Conformément aux résultats de Demertzis & Viegi (2008), un arbitrage émerge entre d'un côté, la provision d'un signal clair pour coordonner les anticipations hétérogènes des agents (grâce à une fourchette étroite) et d'un autre côté, l'assouplissement de l'objectif de politique monétaire (grâce à une fourchette élargie). En effet, lorsque le rayon augmente, les anticipations d'inflation deviennent plus dispersées entre les agents mais la

---

8. Comme précédemment, nous ne tenons pas compte des 100 premières périodes pour éliminer l'effet de l'initialisation aléatoire du modèle et laisser le temps au processus d'apprentissage de faire émerger des comportements cohérents.

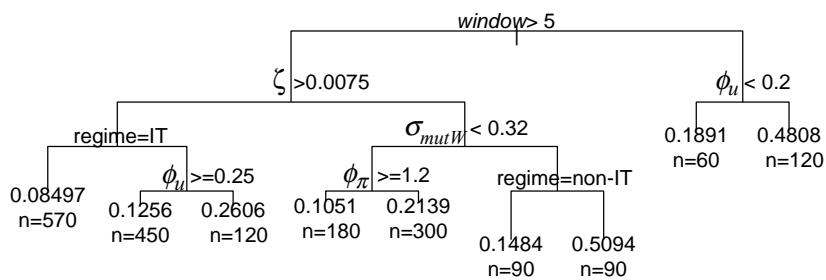


FIGURE 4.3 – Arbre de régression (basé sur l'ANOVA) de la perte de la banque centrale sous les deux régimes (680 données)

Les déterminants sont les 8 paramètres du plan d'expérience de la configuration (4) et un facteur CI/non-CI.

banque centrale parvient mieux à atteindre sa cible et sa crédibilité augmente. Cette crédibilité permet en retour aux anticipations d'inflation d'être en moyenne plus proches de la cible et les performances macroéconomiques s'améliorent. Notre modèle permet donc l'émergence d'une boucle entre crédibilité et succès sous un régime de ciblage de l'inflation, ce qui est beaucoup moins évident dans un régime de non-ciblage.

La figure 4.4a illustre ce mécanisme dans l'expérience 16. Nous choisissons cette expérience car les paramètres y sont fixés proches du milieu de leur domaine de variation et il s'agit d'une situation qui correspond au cas où le ciblage de l'inflation délivre des performances supérieures au régime de non-ciblage (i.e.  $window > 5$  et  $\zeta > 0.75\%$ , comme explicité à la figure 4.3). Sous le régime de ciblage, on constate que les anticipations d'inflation sont contenues dans la fourchette, signalant que la banque centrale est crédible, même après le pic qui survient aux alentours de la 300ième période. Ce pic résulte en une perte de crédibilité de la banque centrale et une augmentation du taux de chômage. Cependant, la situation économique est moins satisfaisante sous le régime de non-ciblage. Sous ce régime, rappelons que  $P_{target}$  est une mesure de la fréquence avec laquelle la banque centrale atteint l'objectif d'inflation. Cette probabilité est bien plus faible que sous un régime de ciblage, signalant que l'inflation y est moins bien stabilisée. De plus, la stabilisation des anticipations d'inflation dans le rayon s'obtient à un coût plus élevé en termes de chômage.

La figure 4.3 montre également que les performances macroéconomiques sont les plus mauvaises lorsque la banque centrale met en place un régime de ciblage de l'inflation avec une fourchette étroite en présence de chocs inflationnistes de forte ampleur (approximés ici par les chocs  $\sigma_{mutW}$ ). La figure 4.4b illustre la dynamique du modèle dans un tel cas, en prenant l'exemple de l'expérience 30. Comme il a été développé à la sous-section III.5 du chapitre 2, ce type de chocs affecte fortement la variabilité de l'inflation et limite la capacité de la banque centrale à stabiliser l'inflation. Ces chocs conduisent alors à une perte rapide de crédibilité, et ce d'autant plus que l'objectif d'inflation est défini de manière

exigeante par une fourchette étroite. Cette perte de crédibilité contribue à désancker les anticipations. En retour, le processus de l'inflation s'éloigne de l'objectif de la banque centrale et cette dernière se trouve privée de la boucle crédibilité/succès. En revanche, sous un régime de non-ciblage, l'objectif est défini de manière moins stricte, ce qui permet de contenir les anticipations d'inflation plus proche de la cible. La stabilisation macroéconomique est bien plus satisfaisante, en particulier en ce qui concerne l'objectif d'emploi. L'intuition derrière ce résultat peut être donnée de la manière suivante : lorsque le point d'ancrage est fixe (la cible, dans le régime de ciblage), une suite d'échecs à stabiliser l'inflation mène à une perte de crédibilité rapide. Dans ce cas, les anticipations sont guidées par l'inflation courante (à un bruit  $\xi$  près, dont l'ampleur est corrélée à celle des chocs inflationnistes). Comme le montre la figure 4.4b, sous le régime de ciblage, les anticipations s'éloignent de plus en plus de la cible. En revanche, si le point d'ancrage est la tendance passée de l'inflation, ce point d'ancrage évolue de pair avec l'inflation effective, et l'inflation a davantage de chance de rester contenue autour de la moyenne. Dans ce cas, les anticipations des agents restent aussi contenues près de la moyenne, et restent plus stables que lorsqu'elles se trouvent guidées de période en période par l'inflation courante, comme c'est très vite le cas dans le régime de ciblage et que la banque centrale a perdu sa crédibilité. En retour, la stabilisation macroéconomique est plus satisfaisante dans le régime de non-ciblage. La comparaison des figures 4.1, page 175 et 4.2, page 177, illustre aussi cette intuition : pour une même séquence de taux d'inflation délivré, la probabilité de succès  $P_{target}$  demeure plus élevé dans le régime de non-CI que dans le régime de CI, car le point de référence (i.e. la moyenne des taux d'inflation passés) évolue de pair avec l'inflation observée.

Enfin, il ressort des figures 4.4a et 4.4b que, dans les deux régimes, les anticipations d'inflation et l'inflation semblent très fortement et positivement corrélées, ce qui laisse sous-entendre que le canal des anticipations est le déterminant primordial de l'inflation dans le modèle.

En conclusion, un régime de ciblage de l'inflation n'est pas nécessairement le régime qui stabilise au mieux l'économie. Ce résultat dépend de la volatilité de l'environnement, de la fourchette autour de la cible et de la règle de politique monétaire. Plus précisément, pour qu'un régime de l'inflation soit plus favorable qu'un régime de non-ciblage, l'objectif d'inflation ne doit pas être défini de manière trop stricte (i.e. la fourchette doit être plutôt large) et les chocs, en particulier les chocs inflationnistes, doivent être d'ampleur modérée. La figure 4.3 suggère aussi que les règles agressives vis-à-vis de l'inflation parviennent mieux à stabiliser l'économie, que les stratégies de réaction plus modérée, notamment lorsque l'objectif d'inflation est strict ( $\zeta$  petit). Ce résultat est en phase avec le principe de Taylor dans les modèles NK (Woodford (2003b), Bullard & Mitra (2002)). L'effet de la réaction au taux de chômage apparaît quant à lui moins tranché. Les liens entre coefficients de réaction de

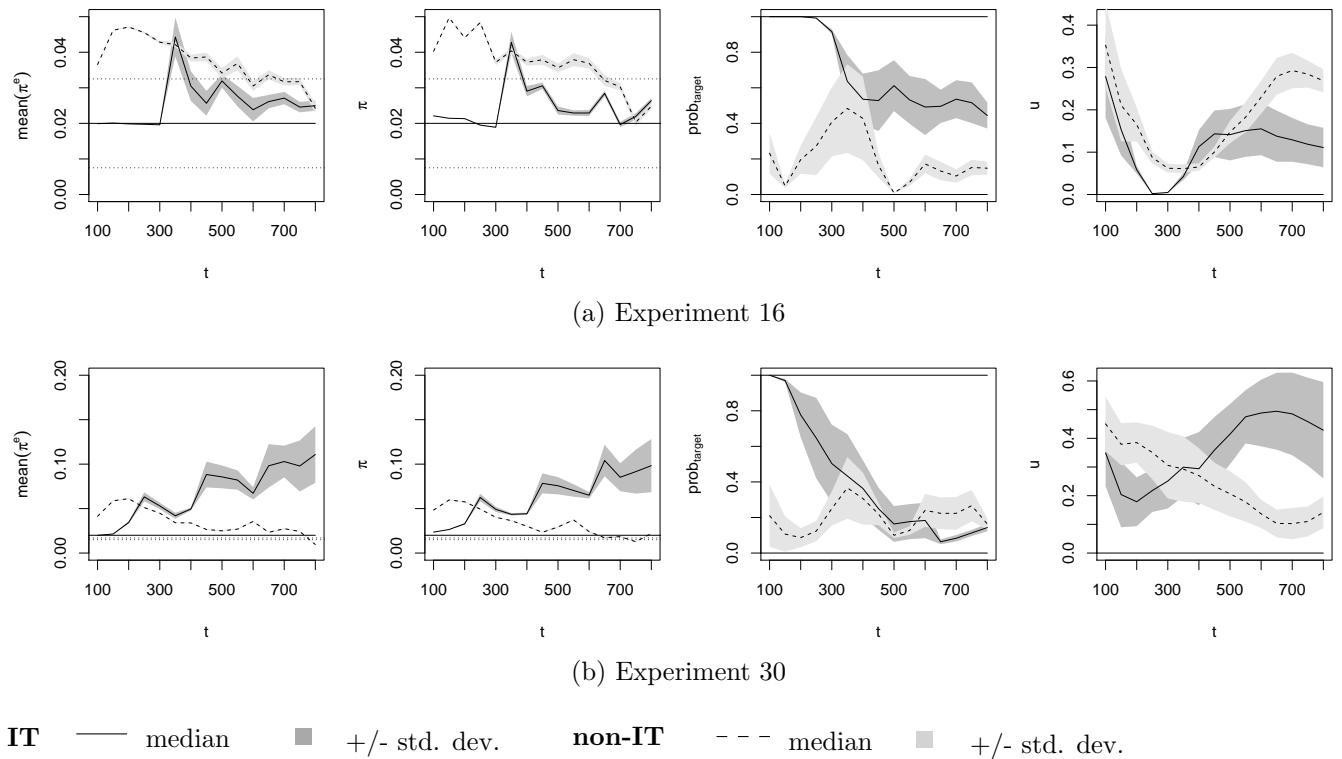


FIGURE 4.4 – Dynamique macroéconomique dans les expériences 16 et 30 (configuration 4)

la règle de politique monétaire, environnement d'apprentissage, stratégie d'annonce et performances macroéconomiques sont explorés en détails dans ce qui suit.

Nous tirons de cette analyse préliminaire la proposition suivante :

**Proposition 9** *Les bénéfices de l'annonce d'une cible en terme de stabilisation de l'inflation se manifestent surtout dans un environnement de chocs d'ampleur faible à modérée. Dans ces conditions, une boucle succès/créabilité se met en place, permettant à la cible de jouer le double rôle de point de référence pour l'évaluation de la politique monétaire et de point focal pour coordonner les anticipations privées.*

Comme suggéré par Demertzis & Viegi (2009), il peut exister des situations où annoncer la cible d'inflation peut jouer en la défaveur de la Banque centrale, en comparaison d'autres régimes de politique monétaire moins transparents. La suite de l'analyse se focalise sur cette question : quel régime est le plus favorable du point de vue de la stabilisation macroéconomique – double objectif d'emploi et d'inflation – en fonction des chocs prédominants ?

### I.2.2 Volatilité de l'environnement et politique monétaire optimale

Après avoir donné une première vue de la dynamique émergente du modèle augmenté des anticipations d'inflation, nous déterminons la politique monétaire optimale en fonction de la configuration de chocs. Par politique monétaire, nous entendons trois composantes : régime (ciblage ou non), niveaux de la cible et de la fourchette ainsi que valeurs des coefficients de réaction de la règle.

**Méthode d'analyse** Pour ce faire, nous définissons plusieurs scenarii de chocs : i) un environnement dit stable où l'on pose  $\sigma_{mutK} = \sigma_{mutW} = 0.05$ ; ii) un environnement dominé par des chocs inflationnistes forts avec  $\sigma_{mutK} = 0.05$  et  $\sigma_{mutW} = 0.4$  et iii) un environnement caractérisé par une forte incertitude sur le canal de la consommation où l'on a  $\sigma_{mutW} = 0.05$  et  $\sigma_{mutK} = 0.4$ . Dans chacun de ces trois scenarii, nous testons l'effet de chacun des deux régimes, avec une cible d'inflation de 2% et deux niveaux de fourchette – 0.1 et 1%<sup>9</sup>. Nous obtenons alors  $3 \times 2 \times 2 = 12$  cas, pour chacun des deux régimes (soit un total de 24 cas). Dans chacun de ces cas, les paramètres de la règle –  $\phi_\pi$  et  $\phi_u$  – varient selon un plan d'expérience à deux facteurs, impliquant 17 simulations, donné au tableau D.2 en annexe I. Nous testons également la robustesse des résultats obtenus à différentes valeurs de la cible d'inflation. Comme explicité plus haut, dans le but de réduire les degrés de liberté du modèle, nous fixons  $window = 20$ ,  $P_{imit} = 0.1$  et  $P_{mut} = 0.02$ <sup>10</sup>. Nous obtenons ainsi la configuration 5 donnée au tableau 4.1. Pour le reste, elle ne diffère pas de la configuration 4.

Pour chacun des 24 cas définis, nous nous servons du modèle de krigeage introduit au chapitre 2 comme technique de métamodélisation. Ceci nous permet d'approximer la valeur de la fonction de perte  $\mathcal{L}$  en fonction des configurations de politique monétaire évaluées. Au vu du faible nombre d'observations dont nous disposons (seulement 17 expériences), ce type de modèle permet des estimations plus précises que la régression classique (van Beers & Kleijnen (2004)). La démarche est détaillée dans l'encadré 4.1, page 185 (voir aussi Salle & Yıldızoglu (2012)).

Nous calculons la valeur de la fonction de perte (4.2) pour chacun des runs en retenant la moyenne de l'inflation et du taux de chômage sur le run (comme explicité précédemment). La figure D.1 en annexe I indique la variance des observations de la fonction de perte en fonction du nombre de runs

9. Ces deux niveaux de fourchette reviennent à tester deux scenarii : "annoncer une cible seule, *i.e.* un point" et "annoncer une cible assortie d'une fourchette de tolérance de +/-1%", ce qui correspond aux niveaux observés pour les fourchettes en pratique. Par exemple, la Banque Centrale de Nouvelle-Zélande annonce une fourchette d'inflation (3-5% de 1989 à 2002 et 1-3% depuis), alors que la Banque Centrale d'Angleterre annonce un point ciblé (2.5% de 1999 à 2004 et 2% depuis).

10. En effet, la figure 4.3 suggère que seule une valeur très faible de  $window$  (5 périodes en l'occurrence sur les 40 testées) a un impact (négatif) sur la dynamique macroéconomique. On voit aussi que ce sont les chocs  $\sigma_{mutK}$  et  $\sigma_{mutW}$  qui ont un effet, davantage que leur probabilité d'occurrence  $P_{mut}$ . Fixer ces valeurs n'apparaît pas alors restreindre la portée de l'analyse.

**Encadré 4.1 – Métamodélisation par krigeage – application (voir Salle & Yıldızoglu (2012) pour une présentation détaillée)**

Nous reprenons la présentation du modèle de krigeage en annexe II du chapitre 2. Ici, pour chacun des 24 cas, nous avons un plan à  $k = 2$  facteurs  $x \equiv (\phi_\pi, \phi_u)$  définis sur  $D \equiv [0, 2] \times [0, 1]$  comprenant  $n = 17$  observations de la réponse  $y(x) \equiv \mathcal{L}(\phi_\pi, \phi_u) \in \mathbb{R}$  (cf. annexe I de ce chapitre)<sup>a</sup>. Nous cherchons à prédire de manière optimale, pour chaque couple de coefficients de réaction  $(\phi_\pi, \phi_u)$ , la valeur de la fonction de perte  $\mathcal{L}$  par l'intermédiaire d'un processus aléatoire  $Y(x) \equiv L(x)$  ou métamodèle. Ce métamodèle est estimé à partir d'une combinaison linéaire des 17 observations de  $\mathcal{L}$  dans le plan d'expérience, notées  $(\mathcal{L}(\mathbf{x}_1), \dots, \mathcal{L}(\mathbf{x}_{17}))$ . On pose  $\forall x \in [0, 2] \times [0, 1] \in \mathbb{R}^2$  :

$$L(x) = \mu(x) + Z(x) \quad (4.3)$$

avec une fonction de tendance  $\mu : x \in [0, 2] \times [0, 1] \in \mathbb{R}^2 \rightarrow \mu(x) = \sum_{j=1}^l \beta_j f_j(x) \in \mathbb{R}$ ,  $l > 0$ , où  $f_j$  sont des fonctions fixées et  $\beta_j$  des coefficients inconnus à estimer, et  $Z$  un processus aléatoire centré de matrice de variances-covariances  $C : (u, v) \in [0, 2] \times [0, 1] \rightarrow C(u, v) \in \mathbb{R}$ .

Deux questions doivent être tranchées par le modélisateur : i) le choix de la forme de la tendance  $\mu$ , autrement dit la spécification des fonctions  $f_j$  et ii) le choix de la fonction de covariance  $C$ . Nous adoptons alors une démarche en deux temps.

D'une part, nous avons deux facteurs  $x \equiv (\phi_\pi, \phi_u)$ . Nous définissons donc quatre formes possibles pour la tendance, à savoir une simple tendance (kriging ordinaire) :

$$\mu(x) = \beta_0 \quad (I)$$

un polynôme de premier degré :

$$\mu(x) = \beta_0 + \beta_{\phi_\pi} \phi_\pi + \beta_{\phi_u} \phi_u \quad (II)$$

auquel on peut ajouter les interactions de premier ordre :

$$\mu(x) = \beta_0 + \beta_{\phi_\pi} \phi_\pi + \beta_{\phi_u} \phi_u + \beta_{\phi_\pi \phi_u} \phi_\pi \phi_u \quad (III)$$

et une forme quadratique de second ordre :

$$\mu(x) = \beta_0 + \beta_{\phi_\pi} \phi_\pi + \beta_{\phi_u} \phi_u + \beta_{\phi_\pi \phi_u} \phi_\pi \phi_u + \beta_{\phi_\pi^2} \phi_\pi^2 + \beta_{\phi_u^2} \phi_u^2 \quad (IV)$$

Nous estimons alors chacun de ces quatre modèles (I), (II), (III) et (IV).

D'autre part, nous utilisons les packages `DiceKriging`, `DiceEval` et `DiceOptim` du logiciel R Development Core Team (2009) pour estimer le métamodèle  $L$  (voir Roustant et al. (2010)). La fonction de covariance par défaut est un processus gaussien continu donné par la fonction *Matérn*  $v = \frac{5}{2}$  :

$$C(x_i, x_j) = \sigma_Y^2 \prod_{g=1}^2 \left( 1 + \frac{\sqrt{5}|x_i - x_j|}{\theta_g} + \frac{5(x_i - x_j)^2}{3\theta_g^2} \right) \exp \left( -\frac{\sqrt{5}|x_i - x_j|}{\theta_g} \right) \quad (3)$$

<sup>a</sup>. Comme il a déjà été souligné à l'annexe II du chapitre 2, rappelons que dans le cas de simulations non-déterministes, le modèle de krigeage est appliqué sur la moyenne des réponses obtenue sur les 40 réplications (van Beers & Kleijnen (2004)).

Cette fonction présente l'avantage de donner des trajectoires de classe C2 (*i.e.* deux fois dérивables). Elle est donc plus lisse que la fonction gaussienne ou exponentielle (cf. équations (B.8) et (B.7), annexe II du chapitre 2) et l'estimation des paramètres est en général plus précise (Roustant et al. (2010)). Nous retenons cette fonction pour l'estimation des 4 modèles.

Pour trancher ensuite entre les 4 spécifications de la tendance, nous avons recours à la validation externe : à partir d'un plan hypercube latin aléatoire à 8 expériences (*package* `lhs` du logiciel R Development Core Team (2009)), nous estimons la valeur de la fonction de perte  $\mathcal{L}$  à ces 8 points supplémentaires (donnés au tableau D.2 en annexe I). Nous choisissons la spécification qui minimise l'erreur quadratique moyenne entre les valeurs observées et les valeurs prévues par les modèles (I), (II), (III) et (IV). Ces valeurs (ci-après *RMSE – Root Mean Square Error*) sont données pour chacun des 24 cas en annexe D.4. Ceci donne une évaluation plus précise de la qualité de l'ajustement du modèle que la validation croisée, peu robuste sur des plans à peu de points (ce qui est notre cas ici, avec 17 observations). La validation externe permet quant à elle de détecter les problèmes de surajustement du modèle lorsque le nombre d'observations est limité. En cas de résultats similaires, il est aussi toujours préférable de répondre à un critère de parcimonie et de limiter les paramètres à estimer. En effet, le modèle (I) implique un seul paramètre, le modèle (II) trois, le modèle (III) quatre et le modèle (IV) cinq alors que nous ne disposons que de peu d'observations. Cependant, le modèle le plus parcimonieux – le kriging ordinaire (modèle (I)) – est plus sensible aux spécifications de la fonction de covariance (Roustant et al. (2010)). Ajoutons enfin que nos observations étant stochastiques, nous mesurons la variance de la réponse à chacun des 17 points parmi les 40 réplications  $\{\tau_1^2, \dots, \tau_{17}^2\}$  et l'intégrons au modèle de krigeage (cf. sous-section II.2.5, annexe II du chapitre 2).

Pour finir, une fois que nous disposons d'un métamodèle satisfaisant au vu de la démarche exposée, nous cherchons le couple  $(\phi_\pi^*, \phi_u^*)$  qui minimise la valeur estimée de la fonction de perte ainsi que la valeur de la fonction de perte correspondante  $L^*$ . Cette optimisation est rendue possible par les *packages* `rgenoud` (*R-GENetic Optimization Using Derivatives*, voir Mebane & Sekhon (2011)) et `DiceOptim` (voir Roustant et al. (2010)) du logiciel R Development Core Team (2009). Cet algorithme s'avère très puissant car il combine une méthode d'optimisation fondée sur les dérivées de l'objectif (quasi-Newton) à un algorithme de recherche évolutionnaire. La première s'avère efficace localement, au voisinage des *optima* alors que le second permet de sélectionner globalement des régions d'*optima* potentiels, même en présence d'objectifs non-linéaires ou discontinus.

pour un des cas (un régime de ciblage de l'inflation sans fourchette)<sup>11</sup>. Au delà de 40 réplications, la variance ne diminue pas significativement. Tenant compte du coût computationnel des simulations, nous choisissons alors de répliquer chacune des 17 expériences 40 fois, ce qui amène un total de 680 runs donc de 680 observations de la fonction de perte.

Ne disposant que de deux variables exogènes –  $(\phi_\pi, \phi_u)$ , nous pouvons représenter graphiquement les valeurs estimées de la fonction de perte en fonction de ces paramètres de la politique monétaire. Les figures 4.5, 4.6 et 4.7 donnent ces valeurs pour une cible  $\pi^T = 2\%$  dans les trois

11. La figure indique aussi la variance de la distance moyenne à l'utilité potentielle (*i.e.*  $distToPotUtility/n$ , cf. tableau 3.3 au chapitre 3). En effet, cette variable est également un indicateur des performances de l'économie et permet de s'assurer du nombre de réplications nécessaires.

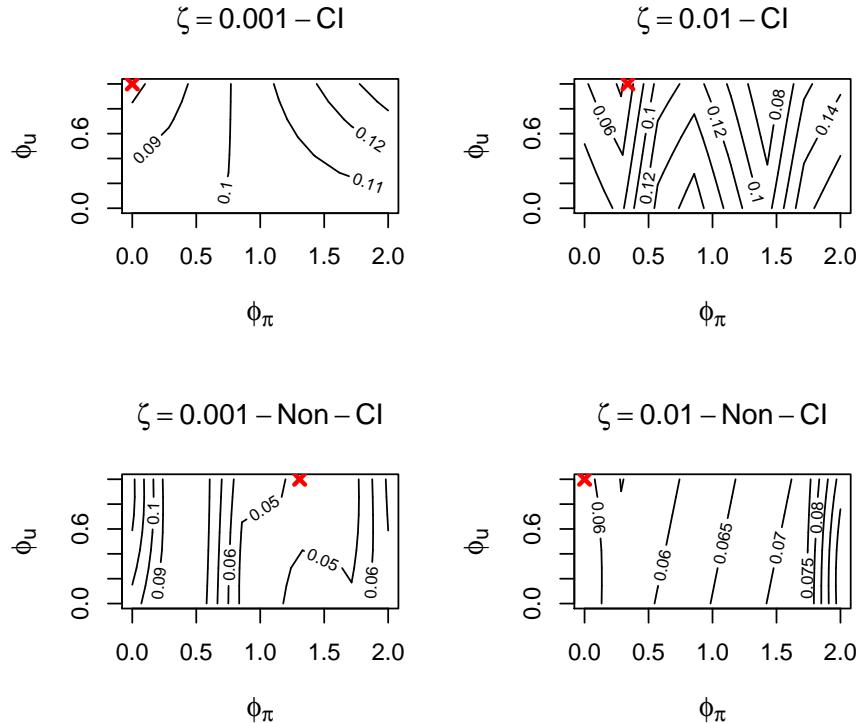
configurations définies ci-dessus, à savoir respectivement une configuration stable caractérisée par  $(\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}) = (0.05, 0.05)$ , une configuration dans laquelle le canal de la consommation est fortement perturbé avec  $(\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}) = (0.4, 0.05)$  et une dans laquelle les chocs inflationnistes sont de forte ampleur  $(\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}) = (0.05, 0.4)$ . Dans chaque cas, la politique monétaire optimale  $(\phi_\pi^*, \phi_u^*)$  est reportée ainsi que la valeur correspondante de la fonction de perte estimée à ce point  $L^*$ <sup>12</sup>.

**Résultats** Tout d'abord, dans un *environnement stable*, un régime de CI accompagné d'une fourchette permet de stabiliser au mieux l'économie. Au contraire, si la cible est un signal très précis ( $\zeta + / - 0.1\%$ ), le régime de CI perd son attractivité. Ce résultat tient au fait que dans ce cas-là, le signal est trop exigeant et la banque centrale ne parvient pas à mettre en place la boucle crédibilité/succès. Une fourchette de tolérance permet au contraire de maintenir la crédibilité en partie – même si les niveaux observés, 16.5% en moyenne, sont relativement faibles. Du fait de cette crédibilité, les anticipations d'inflation sont mieux contenues autour de la cible – même si, là encore l'anticipation moyenne est au-delà de 4% pour une cible de 2% dans le meilleur des cas. Le meilleur ancrage des anticipations permet de stabiliser l'inflation et la banque centrale a alors intérêt à ne réagir qu'aux déviations vis-à-vis de la situation de plein emploi ( $\phi_u$  proche de 1 et  $\phi_\pi$  faible). Ceci indique aussi qu'il n'y a pas d'arbitrage entre les deux objectifs de la règle de politique monétaire puisque réagir à un seul d'entre eux est suffisant pour minimiser la fonction de perte.

Le bénéfice d'un signal vague quant à l'objectif des autorités monétaires en termes de stabilisation macroéconomique (typiquement une fourchette plutôt qu'une valeur précise) a été démontré notamment dans les travaux de Stein (1989) ou Garfinkel & Oh (1995)). Cependant, notons une différence importante avec la mécanique à l'oeuvre dans leur modélisation : ces auteurs obtiennent ce résultat dans le cadre d'analyse de l'incohérence temporelle de la politique monétaire , dans lequel la banque centrale a une incitation à créer de l'inflation surprise tout en tentant de maintenir sa crédibilité sur son engagement à délivrer le taux d'inflation annoncé. Dans ce cas, un objectif plus vague permet à la banque centrale de dévier de la cible exacte d'inflation tout en restant dans la fourchette annoncée et de maintenir ainsi sa crédibilité. Dans notre cadre, la banque centrale n'a aucune incitation à dévier de la cible d'inflation annoncée mais les chocs peuvent l'empêcher d'atteindre son objectif, et mettre à mal sa crédibilité.

---

12. Ceci nous permet, en deux dimensions, de vérifier les résultats de l'algorithme d'optimisation et d'établir sa fiabilité sur des modèles avec un nombre de dimensions supérieur (voir sous-section I.3 ci-après).



	$\zeta = 0.001 - \text{CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{CI}$	$\zeta = 0.001 - \text{Non-CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{Non-CI}$
$\phi_\pi^*$	0	0.34	1.31	0
$\phi_u^*$	1	1	1	1
$L^*$	0.077	0.0367	0.0486	0.0551
$\text{mean}(\pi_i^a)$	0.0601	0.0447	0.0598	0.0438
$P_{\text{target}}(800)$	0.0079	0.1625	0.0244	0.234

FIGURE 4.5 – Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la banque centrale,  $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.05\}$  et  $\pi^T = 2\%$ .

La croix rouge sur les graphiques donne le minimum estimé de la fonction de perte  $L^*$ , correspondant aux coefficients  $\phi_\pi^*$  et  $\phi_u^*$ . La moyenne des anticipations d'inflation  $\text{mean}(\pi_i^a)$  est mesurée tous runs et toutes périodes  $t \geq 100$  confondus et  $P_{\text{target}}(800)$  donne la crédibilité moyenne tous runs confondus de la banque centrale à la dernière période ( $P_{\text{target}}(0) = \frac{1}{3}$ ).

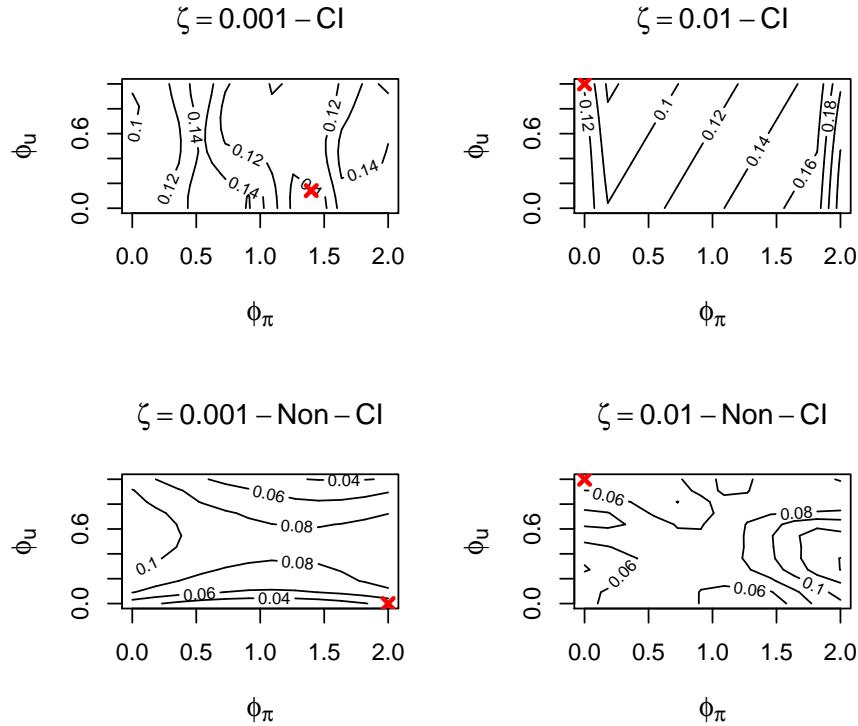
La situation change quelque peu lorsque l'on introduit une *forte volatilité sur le canal de la consommation* (cf. figure 4.6). Là non plus, il ne semble pas y avoir d'arbitrage entre les deux objectifs, car il est optimal pour la banque centrale de ne réagir qu'à un des deux objectifs. Lorsque le signal est très précis ( $\zeta = 0.1\%$ ), il semble plus judicieux de réagir – et fortement – à l'inflation pour stabiliser l'économie, le ciblage strict d'inflation est alors optimal. Il est vraisemblable que, dans ce cas là, l'objectif d'inflation strict peine à enclencher la boucle crédibilité/succès et les anticipations des agents se trouvent plus éloignées de la cible (du fait d'une crédibilité moindre). Réagir à l'inflation permet de répondre à cette déviation des anticipations vis-à-vis du point annoncé et par là, de mieux stabiliser

l'ensemble de l'économie. Au contraire, lorsque la fourchette est large, ne réagir qu'au taux de chômage minimise sa perte<sup>13</sup>. Nous constatons surtout qu'un régime de non-CI est plus performant lorsqu'une forte incertitude pèse sur le canal de transmission réel de la politique monétaire. Ce résultat indique que le cercle vertueux entre crédibilité et succès permis par l'annonce de la cible ne parvient pas à se mettre en place dans ce cas.

Nous reportons en annexe III.1 les résultats pour une cible de 4% (voir figure D.10 en annexe III.1). Une cible à 4% permet pratiquement d'isoler l'économie de ce type d'incertitude (la valeur estimée de la fonction de perte étant très faible – 0.0094). Lorsqu'une grande incertitude existe sur le canal de transmission réel de la banque centrale (*i.e.* les chocs  $\sigma_{mutK}$  sont dominants), relever le niveau de la cible d'inflation permet de stabiliser davantage l'économie. Cette situation d'incertitude caractérise particulièrement la situation actuelle, où les difficultés financières mettent à mal les canaux de transmission traditionnels de la politique monétaire (Minegishi & Cournède (2009)). Les meilleures performances associées à un objectif d'inflation plus lâche font écho à la suggestion couramment discutée de relever le niveau des cibles d'inflation pour juguler la crise actuelle, interprétée comme un choc de demande de forte ampleur (voir la première contribution de Summers (1991) et le lien invoqué avec la crise actuelle par Blanchard et al. (2010)).

En considérant des *chocs inflationnistes via* le canal des anticipations, les performances macroéconomiques se détériorent fortement (cf. figure 4.7). Ce type de chocs affecte directement la dynamique inflationniste *via* les anticipations d'inflation (voir la sous-section III.5 au chapitre 2). Les anticipations d'inflation s'éloignent alors de la cible et le processus inflationniste devient en majeure partie guidé par les anticipations (second terme de l'équation (2.87), page 106), sans rapport avec l'évolution de la production. Ce mécanisme introduit un arbitrage entre la stabilisation de l'inflation et celle du taux de chômage. La banque centrale a ainsi intérêt à réagir fortement à ces deux objectifs *simultanément*. Là encore, annoncer une cible explicite ne permet pas de stabiliser l'économie en présence de ce type de chocs, quel que soit le rayon toléré autour de cette cible. Ce résultat rejoint les conclusions de Demertzis & Viegi (2009) : en cas de chocs forts sur la dynamique inflationniste, le CI est inefficace car la banque centrale perd inévitablement sa crédibilité, et ce parce que la cible annoncée représente un point d'évaluation explicite de ses performances. La persistance de ces chocs empêche ensuite la banque centrale de retrouver la crédibilité perdue. Le CI est alors contreproductif et la banque centrale stabilise mieux ces chocs en ne communiquant pas sa cible.

13. Bien sûr, la valeur de la fourchette perd de son interprétation dans le cas d'un régime de non-CI. Elle n'intervient alors que dans la mécanique de la révision des anticipations. De même, la crédibilité est une notion implicite, calculée comme la probabilité que l'inflation soit contenue près de la cible, bien que les agents n'en aient pas connaissance. Comme il a déjà été dit, dans un régime de non-CI, elle ne sert alors que d'indicateur de performance de la stabilisation de l'inflation.



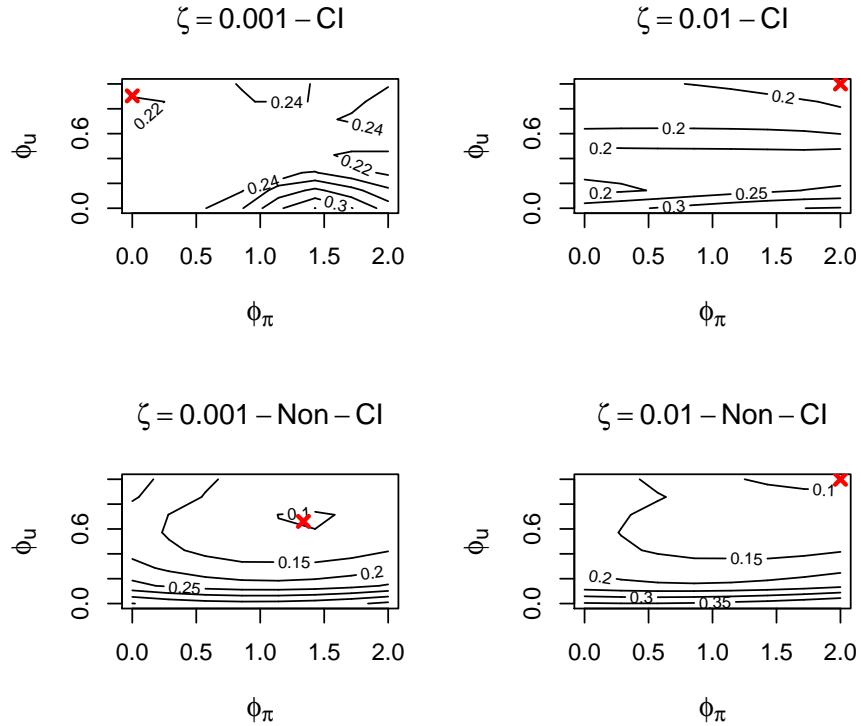
	$\zeta = 0.001 - \text{CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{CI}$	$\zeta = 0.001 - \text{Non-CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{Non-CI}$
$\phi_{\pi}^*$	1.4	0	2	0
$\phi_u^*$	0.14	1	0	1
$L^*$	0.0897	0.0686	0.0343	0.0543
$\text{mean}(\pi_i^a)$	0.0489	0.0447	0.034	0.0345
$P_{\text{target}}(800)$	0.0057	0.1688	0.0245	0.2149

FIGURE 4.6 – Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la banque centrale,  $\{\sigma_{\text{mut}W}, \sigma_{\text{mut}K}\} = \{0.05, 0.4\}$  et  $\pi^T = 2\%$ .

Néanmoins, dans ce cas, une cible plus faible (1%) améliore l’ancrage des anticipations d’inflation (elles sont en moyenne plus proches de la cible, voir la figure D.11 en annexe III.1). Ce résultat apparaît intuitif dans la mesure où les chocs  $\sigma_{\text{mut}W}$  traduisent l’ampleur des effets de second-tour qui lient directement l’inflation anticipée à l’inflation effective. Une cible plus faible contribue à maintenir les anticipations d’inflation à un niveau plus faible et par là à limiter l’écart d’inflation.

Nous parvenons ainsi à cette proposition :

**Proposition 10** *Ne pas divulguer la cible permet d’assurer la banque centrale contre une perte de crédibilité certaine face à des chocs inflationnistes de forte ampleur qui perturbent sa capacité à stabiliser l’économie. Dans ce cas, un régime de non-CI délivre des performances supérieures à un régime où la cible d’inflation est connaissance commune. En outre, la règle optimale est une règle agressive.*



	$\zeta = 0.001 - \text{CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{CI}$	$\zeta = 0.001 - \text{Non-CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{Non-CI}$
$\phi_\pi^*$	0	2	1.34	2
$\phi_u^*$	0.89	1	0.66	1
$L^*$	0.2111	0.182	0.0962	0.0877
$\text{mean}(\pi_i^a)$	0.1214	0.1113	0.0879	0.0784
$P_{\text{target}(800)}$	0.002	0.0459	0.0024	0.0348

FIGURE 4.7 – Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la banque centrale,  $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$  et  $\pi^T = 2\%$ .

En effet, quel que soit le cas considéré, la politique monétaire optimale implique toujours une règle agressive. Ceci peut être lié à la littérature sur la politique monétaire optimale en situation d'incertitude, déjà mentionnée au chapitre précédent. Le Bihan & Sahuc (2001) et Schmidt-Hebbel & Walsh (2009) proposent deux revues de cette littérature. On peut distinguer trois types d'incertitude. Les deux premières concernent l'ampleur des chocs qui frappent l'économie et la mesure des variables pertinentes pour la conduite de la politique monétaire (taux naturels, écart de production). Cette incertitude est qualifiée d'additive dans la mesure où elle implique un terme d'erreur aléatoire qui est ajouté de manière linéaire dans le modèle économique sous-jacent. Dans ce cas, le principe d'équivalent certain pose que la politique monétaire doit agir de la même façon en présence de ce type d'incertitude qu'en environnement certain (Theil (1958)). Dans le modèle à base d'agents que

nous analysons, il y a certes une incertitude sur les chocs mais la banque centrale n'a pas de problème d'erreur dans le calcul des variables (taux de chômage et taux d'inflation). Cependant, le principe d'équivalent certain ne tient pas. En effet, la banque centrale ne conduit pas une politique monétaire globalement optimale, dans le sens où les coefficients de la règle ne résultent pas d'une minimisation de la fonction de perte sous la contrainte du modèle de l'économie. Elle a recours au contraire à une règle de Taylor instrumentale appliquée dans un environnement non-linéaire caractérisé par une incertitude sur le modèle de l'économie. Il s'agit du troisième type d'incertitude : il porte sur les mécanismes de transmission de la politique monétaire à l'économie (sur les paramètres du modèle sous-jacent de l'économie). On parle d'incertitude multiplicative puisque le terme d'erreur intervient de manière non-linéaire (paramétrique) dans le modèle de l'économie. Face à cette forme d'incertitude, les travaux de Brainard (1967), entre autres, ont d'abord montré que la réponse aux chocs doit être plus modérée qu'en situation certaine, on parle du principe de conservatisme. Néanmoins, ces conclusions sont obtenues sous des hypothèses fortes, en particulier que les paramètres du modèle sont de moyenne connue et distribués indépendamment les uns des autres. Si les chocs et les paramètres qui décrivent les canaux de transmission de la politique monétaire sont corrélés, comme c'est le cas par construction dans notre modèle, les recommandations peuvent différer. Il n'y a pas de consensus sur la politique à mener face à ce type d'incertitude. Des travaux ont montré qu'une politique plus agressive était de mise, par exemple si la banque centrale ne peut établir précisément l'ampleur de la réaction de l'inflation effective à l'inflation anticipée, ce qui est aussi le cas ici (Söderström (2002)). La littérature sur l'apprentissage actif souligne que la banque centrale fait face à un arbitrage entre expérimentation et exploitation : la banque centrale a intérêt à être plus réactive face aux chocs qu'en situation certaine pour révéler de l'information sur le modèle de l'économie. Ceci lui permet d'extraire de l'information pour améliorer la conduite subséquente de la politique monétaire. Cependant, cette forte réaction est coûteuse en termes de stabilisation de l'économie à court terme (voir notamment Wieland (2000) sur ce point). La théorie du contrôle robuste, quant à elle, a l'avantage de permettre d'envisager une incertitude radicale sur le modèle de l'économie, c'est-à-dire que la banque centrale ne peut pas nécessairement assigner une distribution de probabilité *a priori* sur l'ensemble des paramètres de ce modèle. Cette littérature ne fournit pas de résultats généraux mais on observe une convergence des différentes études vers la conclusion quant à l'optimalité de règles agressives face à ce type d'incertitude. C'est le résultat notamment de la contribution de Giannoni (2007) dans un modèle macroéconomique microfondé. Dans un modèle empirique, Tetlow & von zur Muehlen (2001) montrent aussi que plus l'incertitude est peu structurée, dans le sens où on ne peut clairement identifier sur quels paramètres du modèle porte l'incertitude, plus la réponse optimale aux chocs est agressive. Nos

conclusions convergent également vers celles de la littérature sur la robustesse. En effet, quelle que soit la configuration de chocs retenue, la réponse optimale dans le régime qui minimise la fonction de perte implique une réaction agressive.

### I.3 Résultats complémentaires : différents degrés de transparence de la cible

Nous avons montré qu'un régime de non-CI peut s'avérer plus performant qu'une situation où tous les agents connaissent la cible de la banque centrale et évaluent ses performances vis-à-vis de celle-ci, à la fois lorsque le canal réel est fortement perturbé ou que des chocs de forte ampleur contribuent à la volatilité de l'inflation. Cependant, la transparence n'est pas binaire (transparence ou opacité), comme en témoignent les travaux de Walsh (2007), Cornand & Heinemann (2008) et Cornand & Baeriswyl (2010) et la banque centrale peut faire des annonces partielles. Ceci s'interprète de plusieurs façons (Cornand & Heinemann (2008)). Les autorités monétaires peuvent choisir de diffuser leurs informations à certaines communautés uniquement ou dans un langage qui ne peut être compris que par certains agents. C'est le cas lorsque les gouverneurs interviennent devant de petits groupes de journalistes, en marge des publications officielles des banques centrales. De plus, les annonces sont diffusées par les médias, mais tous les agents ne s'informent pas auprès des mêmes, ou avec la même fréquence, si bien qu'il y a des délais inévitables en pratique avant qu'une information devienne connaissance commune. Par ailleurs, on peut aisément concevoir qu'il y ait des frictions dans l'acquisition de l'information. Les agents supportent des coûts pour l'acquérir et n'ont pas tous les mêmes capacités à la traiter et à l'intégrer dans leurs anticipations et décisions économiques.

Tout comme Cornand & Heinemann (2008) ou Walsh (2007), nous définissons alors le degré de publicité de la cible, noté  $P \in [0, 1]$  par la proportion d'agents qui connaissent la cible et se servent de sa valeur pour former leurs anticipations d'inflation. Les autres agents (en proportion  $1 - P$ ) forment leurs anticipations en se servant de la tendance passée de l'inflation comme point de référence (comme dans le mécanisme de révision des anticipations qui prévaut en régime de non-CI, voir sous-section I.1.2). Alors que jusque là nous n'avons considéré que deux cas –  $P = 1$  dans le cas d'un régime de CI et  $P = 0$  dans le cas d'un régime de non-CI – nous considérons que la banque centrale peut choisir un degré de publicité  $P$  partiel. En suivant la démarche de Demertzis & Viegi (2009), nous intégrons également aux variables décisionnelles de la banque centrale la largeur de la fourchette  $\zeta$ . Ainsi, pour chacune des trois configurations de chocs, nous élaborons un plan d'expériences à 4 facteurs –  $\phi_\pi$ ,  $\phi_u$ ,  $\zeta$  et  $P$  (cf. plan D.3 en annexe I), les autres modalités des simulations étant inchangées. Nous

définissons ainsi la configuration 6. Nous appliquons ensuite la méthode de métamodélisation exposée à l'encadré 4.1, page 185 et identifions la configuration de politique monétaire qui minimise la fonction de perte estimée de la banque centrale, i.e. les coefficients  $\phi_\pi^*$ ,  $\phi_u^*$ ,  $\zeta^*$  et  $P^*$  qui donnent la perte  $L^*$  minimale pour différents environnements de chocs<sup>14</sup>. En 4 dimensions, une représentation graphique n'est plus possible, les résultats sont alors reportés dans le tableau 4.2.

Nous pouvons tirer trois enseignements des résultats présentés au tableau 4.2.

Premièrement, dans un environnement peu volatil, il est optimal de conduire une politique entièrement opaque. Cependant, la valeur estimée de l'objectif (0.0363) est très proche de celle obtenue précédemment en régime de transparence totale (0.0367). Ce résultat confirme celui de Demertzis & Viegi (2009) : dans un environnement de chocs de faible ampleur, les performances d'un régime de CI et d'un régime de non-CI sont comparables. Empiriquement, ce résultat conforte le constat que l'ensemble des pays développés a connu, pendant la période dite de "grande modération", une diminution de la variabilité macroéconomique, qu'ils soient en CI ou non (Geraats (2009)). Ainsi, Walsh (2009) dresse un bilan du CI "non-négatif" dans les pays développés pendant cette dite période.

Nous pouvons ainsi souligner la proposition suivante :

**Proposition 11** *Dans un environnement peu perturbé par des chocs, annoncer la cible d'inflation est superflu.*

Deuxièmement, dans le cas où le canal de transmission réel de la politique monétaire est marqué par une forte incertitude (i.e.  $\sigma_{mutK}$  fort), un faible degré de publicité (inférieur à 0.25) sur la cible permet d'améliorer de façon marquée la valeur de la fonction de perte, en comparaison des situations où la cible est connaissance commune ou totalement inconnue.

Contrairement à ce résultat, Walsh (2007) démontre que la transparence doit être totale lorsque l'emphase est sur les chocs de demande. Les deux résultats sont comparables dans la mesure où les chocs de demande qu'il considère sont assimilables aux chocs d'apprentissage  $\sigma_{mutK}$  de notre modèle : dans les deux cas, ils reflètent l'erreur entre la variation de la demande que la banque centrale a voulu provoquer en fixant  $i$  et la variation effectivement constatée. La divergence de nos résultats s'explique par la mécanique très différente des deux modèles. Dans Walsh (2007), la transparence sur la cible permet aux firmes de deviner quel type de chocs – de demande ou d'offre – la banque centrale anticipe. Une trop forte transparence peut s'avérer néfaste en transmettant à l'inflation les erreurs de prévision

14. La méthode est strictement la même qu'à la sous-section I.2.2, à l'exception notable que, comme nous ne disposons que de 17 observations pour 4 variables, nous n'estimons que les formes (I), (II) et (III) de la tendance. En effet, la forme (IV) implique trop de paramètres à estimer par rapport au nombre d'observations. Cependant, les RMSE particulièrement élevées concernant la forme (III) (cf. tableau D.5 en annexe III.2) témoignent du problème de surajustement du modèle (III) lorsque les degrés de liberté du modèle sont trop faibles.

	$(\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}) = (0.05, 0.05)$ $\pi^T = 0.02$	$(\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}) = (0.05, 0.4)$ $\pi^T = 0.02$	$(\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}) = (0.4, 0.05)$ $\pi^T = 0.02$	
$\phi_\pi^*$	0	0	0	0
$\phi_u^*$	1	0.43	1	0.91
$\zeta^*$	0.008	0.01	0.01	0.008
$P^*$	0	0.24	0.05	0.5692
$L^*$	0.0363	0.0271	0.0044	0.0718
				0.0969

Tableau 4.2 – Politiques monétaires optimales.

de la banque centrale. Dans notre travail, il est plutôt question de la clarté du point d'évaluation en présence d'une configuration de chocs donnée qui mettent à mal la conduite de la politique monétaire. Une trop forte transparence peut détériorer les performances de la banque centrale en fournissant un point trop précis, exposant la banque centrale à une perte de crédibilité dans un environnement fortement perturbé. Si la cible n'est disséminée qu'auprès d'une faible proportion d'agents, ce risque est limité, tout en permettant tout de même de conserver une crédibilité partielle si la stabilisation de l'inflation est satisfaisante. A cet égard, dans une configuration de chocs  $\sigma_{mutK}$ , les fourchettes optimales sont proches de 1% : s'assurer contre la perte de crédibilité en fournissant un signal vague est plus important que fournir un signal précis dans le but de coordonner les anticipations. Cette conclusion est intuitive. En effet, si la banque centrale contrôle avec une forte incertitude la demande *via* la fixation de son taux d'intérêt, elle a intérêt à s'assurer du bon fonctionnement de la boucle crédibilité/succès pour améliorer la stabilisation de l'inflation.

Enfin, relever la cible d'inflation permet d'améliorer sensiblement la stabilisation de l'économie. Ce résultat confirme le constat dressé plus haut (cf. figure D.10, annexe III.1) et fait écho aux débats récemment ouverts sur la conduite de la politique monétaire après la crise (cf. Betbèze et al. (2011, p. 28)).

Nous parvenons à dégager la proposition suivante :

**Proposition 12** *Lorsque le canal de transmission réel de la politique monétaire est marqué par une forte incertitude, la banque centrale a intérêt à ne divulguer que très partiellement sa cible. Cette stratégie lui permet de s'assurer contre le risque de perte de crédibilité et de préserver ainsi la boucle crédibilité/succès, qui agit comme un mécanisme stabilisateur sur l'inflation.*

Cet élément appelle une précision sur l'utilité de la transparence dans notre modèle. Dans les contributions liées au débat sur le degré de transparence optimale (cf. chapitre 1, sous-section II), le gain à la transparence provient essentiellement de trois sources. Tout d'abord, la transparence peut servir de mécanisme d'engagement implicite de la banque centrale sur un taux d'inflation faible. Dans

ce cas, annoncer la cible agit pour réduire voire supprimer le biais inflationniste (cf. chapitre 1, section I). Ensuite, lorsque la banque centrale ne communique pas la valeur de ses objectifs, ses actions ont une valeur informative (Geraats (2002)). Ainsi, un changement dans le taux d'intérêt nominal affecte aussi les anticipations des agents. Cet effet perturbe le contrôle de la politique monétaire sur la dynamique macroéconomique et crée un "biais d'opacité" (Walsh (2008)). Annoncer la cible permet alors d'éviter ce biais. Enfin, la coordination des anticipations des agents peut être valorisée directement dans la fonction d'utilité des agents, de sorte qu'ils aient explicitement intérêt à deviner de la manière la plus exacte possible les anticipations des autres (Hellwig (2004)). Dans ce cas, annoncer la cible permet de créer un point focal sur lequel les anticipations des agents peuvent se coordonner.

Dans notre modèle, si gain il y a à l'annonce de la cible, ce ne peut provenir de ces trois sources<sup>15</sup>. En effet, la banque centrale n'a pas de biais inflationniste et les agents ne se servent pas du taux d'intérêt qu'elle fixe pour prévoir l'inflation dans le cas où la cible est inconnue. De plus, l'objectif des ménages est de maximiser leur consommation (en termes réels). Leurs anticipations d'inflation interviennent dans la mise à jour de leurs salaires nominaux et dans leurs décisions d'arbitrage consommations présente/futures. Ils ne cherchent donc pas directement à anticiper les anticipations des autres. Néanmoins, les anticipations d'inflation des autres agents déterminent pour partie leur utilité dans la mesure où elles déterminent en retour la dynamique inflationniste de l'économie, qui a des conséquences sur le comportement de l'économie. Les phases de validation du modèle ont prouvé que la coordination des anticipations d'inflation des agents est préférable, en particulier sur l'objectif ciblé de la banque centrale, pour que les autorités monétaires pilotent plus efficacement l'économie (cf. section III, chapitre 3). C'est ce rôle coordonnateur que la cible joue dans notre modèle. Or ce rôle n'est possible qu'à condition que la banque centrale puisse s'assurer une crédibilité à maintenir l'inflation proche de son objectif. *C'est donc cette assurance de crédibilité qui est primordiale.*

Troisièmement, en présence de chocs inflationnistes, une transparence accrue (avec des degrés de publicité supérieurs à 0.5) s'avère en revanche utile. Dans ce cas, la banque centrale a intérêt à ne réagir qu'au chômage. Il semble alors qu'une annonce partielle de la cible supprime l'arbitrage auquel fait face la banque centrale : réagir à un seul des deux objectifs permet de limiter efficacement la perte sur les deux objectifs. Cornand & Baeriswyl (2010) montrent qu'en cas d'opacité sur l'objectif d'inflation, la politique monétaire doit être accommodante vis-à-vis de l'inflation. Ici, nous arrivons à une conclusion similaire dans un cadre où elle n'est pas opaque mais adopte un degré modéré de transparence sur sa cible. Là encore, cette petite divergence tient aux mécanismes différents à l'oeuvre

---

15. En postulant un mécanisme de formation des anticipations plus riche, la section suivante de ce chapitre aborde la question de l'existence d'un biais d'opacité dans notre modèle.

dans les deux modèles. Dans Cornand & Baeriswyl (2010), l'opacité sur la cible accroît l'incertitude sur l'action de la banque centrale et réduit l'efficacité de la politique monétaire sur le niveau général des prix. Dans ce cas, contracter la demande ne parvient pas à réduire le niveau des prix et la banque centrale doit plutôt stabiliser l'écart de production. Ici la cible explicite permet de mieux coordonner les anticipations d'inflation et la banque centrale peut ainsi davantage se préoccuper du chômage. Ici encore, le fait que la cible ne soit pas connue de tous les agents permet à la banque centrale de se prémunir contre le risque de perte de crédibilité, une partie des agents conservant un point d'évaluation plus souple de la politique monétaire, à savoir la tendance passée des taux d'inflation. Lorsque les chocs portent sur le canal des anticipations, une transparence plus importante est requise que lorsqu'il s'agit de chocs sur le canal de la consommation. Intuitivement, on peut avancer l'explication suivante : le rôle coordonnateur de la cible est le plus important lorsque le canal des anticipations est perturbé alors que c'est l'assurance contre la perte de crédibilité qui prime lorsque le canal du taux d'intérêt est atteint. Dans le premier cas, la cible doit alors être disséminée auprès d'une plus forte proportion des agents.

Nous parvenons enfin à cette proposition :

**Proposition 13** *Face à des chocs inflationnistes, une transparence modérée de la cible, associée à un rayon plutôt étroit assouplit l'arbitrage entre l'objectif d'inflation et celui d'emploi. Dans ce contexte, cette stratégie permet avant tout à la banque centrale de coordonner les anticipations sur la cible, tout en limitant le risque de perte de crédibilité par une publicité partielle.*

Nous avons interrogé le double rôle de la cible d'inflation explicite, à la fois comme point de référence dans l'évaluation de la politique monétaire et l'établissement de la crédibilité de la banque centrale, et comme point d'ancrage des anticipations d'agents hétérogènes. Pour ce faire, nous avons poursuivi les travaux de Demertzis & Viegi (2008, 2009) dans un contexte de rationalité limitée et d'apprentissage et montré qu'annoncer la cible d'inflation peut mener à une stabilisation moins satisfaisante de l'économie, par rapport à une situation où la banque centrale reste, au moins partiellement, opaque. Nous nous consacrons maintenant plus largement à la question du rôle de la communication de la banque centrale, qui n'implique pas uniquement l'annonce de la valeur de la cible d'inflation.

## II La communication de la banque centrale dans le modèle mental des agents

Dans cette dernière section, nous choisissons une représentation plus sophistiquée de la formation des anticipations des agents qui autorise une spécification plus riche de la communication de la banque centrale. Nous intégrons au modèle minimal un mécanisme de formation des anticipations des ménages, par lequel ils développent une représentation simplifiée des connexions entre les éléments communiqués par la banque centrale et la réalisation effective de l'inflation. Chaque agent dispose ainsi d'une sorte de *modèle mental*, mis en place par un réseau de neurones artificiel, grâce auquel il anticipe l'inflation de manière prospective. Les informations distillées par la banque centrale s'intègrent dans ce modèle et différents niveaux d'informations peuvent potentiellement produire des anticipations différentes. Nous explicitons d'abord ce type d'anticipation et le fonctionnement d'un réseau de neurones, puis nous détaillons la manière dont il entre en jeu dans notre modèle. Ce travail est fortement inspiré de la contribution Yıldızoglu et al. (2012). La dernière sous-section compare les résultats issus de différents niveaux d'informations fournis par la banque centrale.

### II.1 L'apprentissage par un modèle mental

Jusque là, notre travail a retenu un mécanisme de formation des anticipations purement adaptatif, dans lequel les anticipations d'inflation sont dérivées simplement des fréquences passées avec lesquelles l'objectif ciblé est atteint. Il s'agit donc d'un mécanisme fortement inertiel, que l'on peut qualifier de myope. Dans ce cadre, la seule information de la banque centrale susceptible de jouer un rôle sur les anticipations est la cible d'inflation. Ce type de mécanisme ne peut intégrer une communication plus diverse (projections des prévisions des autorités monétaires notamment). Par ailleurs, comme le fait remarquer Levine (2011, p. 2) : "*Although some argue that people are simple-minded and follow simple rules, the practical problem is that people are far better learners and vastly more sophisticated than existing computer models. Real people in the laboratory and the field are able to recognize sophisticated patterns and anticipate future events*". Dennett (1995, p. 185) note ainsi : "*an intelligent being learns from experience, and then uses what it has learned to guide expectations in the future*". Cette projection de l'expérience sur les anticipations requiert que les agents soient capables de "généraliser", autrement dit d'avoir une idée assez précise des résultats qui pourraient prévaloir dans des circonstances encore jamais rencontrées. Les agents doivent pouvoir développer un *modèle mental* de leur

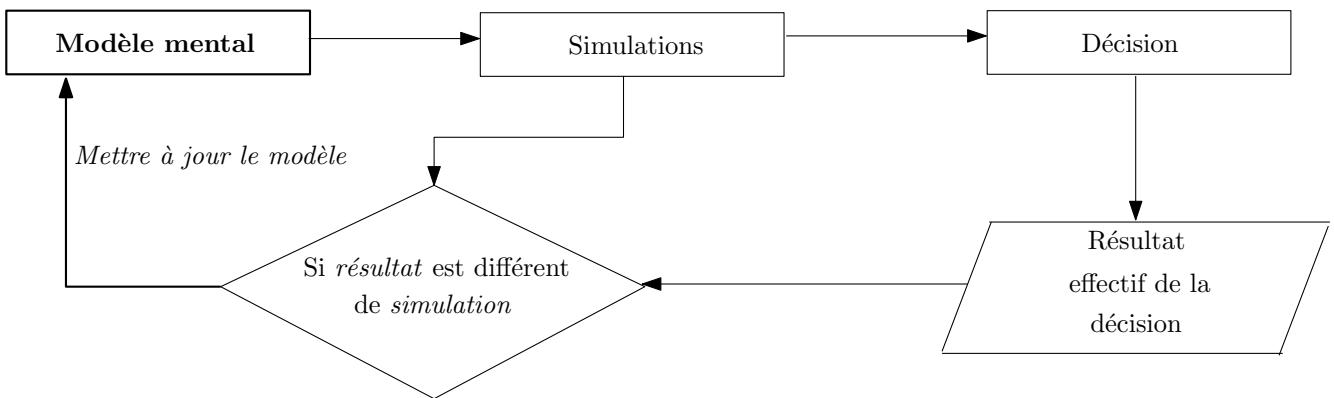


FIGURE 4.8 – Fonctionnement dynamique du modèle mental de chaque agent (Yıldizoğlu (2001)).

environnement (Holland et al. (1989))<sup>16</sup>, grâce auquel ils forment des anticipations "rationnellement limitées" ("bounded rational" expectations). Ces anticipations peuvent être qualifiées de prospectives, par opposition au mécanisme précédent qui dénotait un comportement d'anticipation rétrospectif. Ce type d'apprentissage est dit *cognitif* et c'est sur cette forme d'apprentissage que se focalisent les recherches en psychologie depuis les années 1980 (Brenner (1998, pp. 898-899)) : l'apprentissage cognitif désigne le processus par lequel les sujets développent une compréhension du monde réel et des interrelations qui le sous-tendent.

Nous tentons alors d'enrichir le comportement des agents dans notre cadre d'analyse en supposant que leurs anticipations sont dérivées d'un tel modèle mental, qui englobe l'état courant de leurs connaissances et est mis à jour en fonction des nouvelles informations qui leur parviennent. Ce modèle est une représentation très approximative de la perception par les agents de leur environnement : "In (...) situations [that are not sufficiently simple as to be transparent to human mind], we must expect that the mind will use such imperfect information as it has, will simplify and represent the situation as it can, and make such calculations as are within its power" (Simon (1976, p. 144)). Ces calculs sont des extrapolations du type "Si ..., alors..." qui permettent aux agents de faire le lien entre l'état de leur environnement, compte tenu des informations qu'ils détiennent et l'état anticipé. Concrètement, en intégrant toutes les informations dont ils disposent dans leur modèle mental, celui-ci leur renvoie une anticipation pour la période suivante. Cette prédition est ensuite confrontée à sa réalisation effective la période suivante et le modèle est mis à jour en fonction de l'erreur d'anticipation commise. L'apprentissage correspond ici à une meilleure représentation de la relation entre les *inputs* et l'*output*. Le modèle mental est une structure dynamique, qui évolue comme le décrit la figure 4.8.

L'apprentissage économétrique, utilisé par la récente littérature liant dynamique macroéconomique

16. On trouve aussi dans la littérature les termes modèle *approximatif* ou modèle *procédural* (Salmon (1995)), par analogie à la rationalité procédurale décrite dans les travaux de H. Simon.

et apprentissage, s'inscrit dans cette perspective (voir notamment Sargent (1993) et Evans & Honkapohja (2001)). Les agents sont supposés connaître le modèle sous-jacent, qui est une structure fixe, mais en ignorer la valeur des paramètres. Ils agissent alors comme des économètres et ajustent les paramètres en fonction des nouvelles observations qu'ils acquièrent à chaque période. Cependant, cet apprentissage repose implicitement sur une forme bien précise du modèle mental des agents, qui plus est, est cohérente avec le vrai modèle sous-jacent de l'économie. Cette forme est notamment supposée être une forme linéaire, dont les agents sont supposés avoir une parfaite connaissance. Dans notre modèle à base d'agents, le modèle sous-jacent à l'économie artificielle modélisée est inconnu (tant sa forme que la valeur de ses paramètres) : nous avons alors besoin d'une forme plus flexible de modèle mental. Un réseau de neurones artificiel (ci-après RNA) apparaît comme un bon candidat pour modéliser une telle structure. En effet, un RNA ne nécessite que la liste des *inputs* de l'environnement, la composition de sa structure (i.e. les liens entre les noeuds du réseau) et l'objectif d'*output* pour donner une approximation des liens entre ces *inputs* et l'*output*. Malgré cette parcimonie, un RNA est un outil puissant, capable d'approximer un très grand nombre de modèles, d'un modèle linéaire simple à des fonctions non-linéaires très sophistiquées (Masters (1993, p. 174)). Le RNA est donc moins sujet aux problèmes de mauvaise spécification de la forme du modèle d'estimation que l'apprentissage économétrique, bien que le détail de sa structure puisse parfois fortement conditionner ses performances (Heinemann (2000)). En ce sens, l'apprentissage par un RNA est une méthode plus robuste. De plus, le RNA fournit une structure évolutive et non pas supposée fixe, comme c'est le cas avec l'apprentissage par les moindres carrés ou l'apprentissage bayésien. Il permet aussi de modéliser un véritable apprentissage individuel, grâce auquel les agents développent des modèles mentaux différenciés, qui sont malgré tout tous cohérents avec les données observées de leur environnement, alors que l'apprentissage économétrique a surtout été mobilisé au niveau agrégé. Il permet ainsi de modéliser une hétérogénéité des croyances, des anticipations et des décisions économiques qui en découlent. La métaphore biologique du RNA est le cerveau : comme le cerveau, le RNA est composé de petites unités interconnectées (ou noeuds), dotées de capacités très simples. Le pouvoir du RNA vient de l'interaction de ces unités. Cependant, il ne s'agit que d'une modélisation très grossière de la structure d'un cerveau.

En économie, les RNA ont surtout été utilisés comme méthode de prédiction des séries temporelles, notamment sur les marchés financiers. Peu de travaux les utilisent comme moyen de représenter le comportement d'agents dotés de rationalité limitée (voir par exemple Cho & Sargent (1996) pour une revue de cette littérature, principalement en théorie des jeux, White (1992), Evans & Honkapohja (2001, chap. 15) ou Herbrich et al. (1999)). Salmon (1995) illustre une telle utilisation des RNA à tra-

vers deux exemples. Le premier est basé sur le modèle de Cukierman (1986), qui est une version d'un jeu dynamique à horizon fini à la Barro & Gordon, dans lequel les agents tentent d'inférer les préférences de la banque centrale, tout en faisant face à une incertitude sur le processus qui les détermine. Une forme d'apprentissage par les moindres carrés et une forme d'apprentissage par un RNA sont confrontées. Salmon (1995) montre que le RNA est plus réactif et limite la possibilité qu'a la banque centrale de créer de l'inflation surprise. Le second modèle reprend un modèle d'hyperinflation qui possède deux équilibres (un de faible inflation et un de forte inflation) sous anticipations rationnelles (Sargent & Wallace (1987)) et soit converge vers l'équilibre de faible inflation soit diverge sous apprentissage par les moindres carrés (Marcet & Sargent (1989)). Sous apprentissage par RNA, le modèle converge vers un taux d'inflation faible quelles que soient les conditions initiales et plus rapidement qu'avec un apprentissage par les moindres carrés. Cho & Sargent (1997) utilisent un simple RNA sans niveau caché (un perceptron) dans un modèle à la Kydland & Prescott (1977), dans lequel l'objet de l'apprentissage est la crédibilité de la banque centrale dans un jeu répété. Ils montrent que la construction d'une réputation par les autorités monétaires ne peut remplacer des mécanismes d'engagement dans la mesure où cette forme d'apprentissage ne suffit pas à sélectionner nécessairement l'équilibre de faible inflation, même si elle limite l'ensemble des équilibres possibles sous anticipations rationnelles. Heinemann (2000) montre que les conditions de stabilité obtenues dans une version non-linéaire du modèle *cobweb* avec apprentissage par un RNA sont semblables à celles obtenues dans la version linéaire avec apprentissage par les moindres carrés. Yıldızoglu (2001) utilise un RNA pour modéliser la manière dont les firmes anticipent les conséquences en termes de profit de leurs décisions de R&D. Il montre que prendre en compte ce comportement prospectif permet d'améliorer les performances technologiques à l'échelle de l'industrie. Plus récemment, Sgroia & Zizzo (2007, 2009) montrent que l'apprentissage par un RNA peut reproduire de manière assez fidèle les comportements observés sur des sujets humains dans des expériences en laboratoire consistant à repérer un équilibre de Nash dans des jeux simples. Les taux d'erreur sont en particulier très proches. Enfin, Yıldızoglu et al. (2012) démontrent que des agents utilisant un RNA peuvent approximer la règle de consommation *buffer-stock* de Carroll (2001), ce qui n'est pas le cas avec un apprentissage individuel purement adaptatif ou un apprentissage social.

La section qui suit explique la façon dont ces RNA sont construits et intégrés à notre modèle.

## II.2 L'intégration des réseaux de neurones au modèle minimal

Il y a deux différences entre le modèle développé ci-après et le modèle minimal présenté au chapitre 2. D'une part, comme il a déjà été mentionné ci-dessus, chaque ménage  $i$  est doté d'un RNA, qui

représente son modèle mental et grâce auquel il anticipe l'inflation. Son fonctionnement est détaillé dans ce qui suit. D'autre part, nous supposons que la banque centrale intègre l'écart de production comme objectif dans la règle de Taylor et non pas le taux de chômage. La règle de politique monétaire (2.78) s'écrit alors :

$$1 + i_t = (1 + r_t^n)(1 + \pi^T) \left( \frac{1 + \pi_t}{1 + \pi^T} \right)^{\phi_\pi} \left( \frac{1 + x^*}{1 + x_t} \right)^{\phi_x} \quad (4.4)$$

avec  $x^* = 0$  et  $x_t \equiv \frac{Y_t^n - Y_t}{Y_t^n}$  où le produit naturel est défini comme le produit potentiel  $Y_t^n = n^{1-\alpha}$  (cf. sous-section III.5, chapitre 2). Cette modification est introduite car nous conduisons l'analyse des résultats du modèle grâce à une lecture en termes de courbe de Taylor (1979), qui établit l'arbitrage entre les volatilités de l'inflation et de l'écart de production (cf. sous-section II.3.2). Néanmoins, le taux de chômage et l'écart de production sont fortement corrélés dans notre modèle. Le coefficient d'Okun, noté  $c$ , qui donne l'élasticité du taux de chômage à l'écart de production s'établit entre 0 et 1. En effet, nous avons  $\frac{Y_t^n - Y_t}{Y_t^n} = c(u_t - u^*)$ , ce qui donne ici  $c \equiv \frac{1 - (H_t/n)^{1-\alpha}}{1 - H_t/n} \in ]0, 1[$  (car  $H_t < n$  et  $1 - \alpha < 1$ ). Pour le reste, le fonctionnement du modèle minimal est exactement celui décrit au chapitre 2.

### II.2.1 Informations du RNA et transparence de la banque centrale

Le RNA intègre les signaux de l'environnement (notés  $s_i$ ,  $i = 1, \dots, I$ ), communiqués par les autorités monétaires. Le tableau 4.3 donne la liste de ces signaux en fonction du degré de transparence présumé de la banque centrale. Différents degrés ont été établis en fonction d'études empiriques, notamment celle de Minegishi & Cournède (2009), portant sur la politique de transparence de 11 banques centrales de l'OCDE, pas nécessairement en ciblage de l'inflation, sur la décennie 2000. Quatre domaines sur lesquels la transparence porte sont identifiés : i) les *objectifs* de la politique monétaire, ii) les *décisions* de politique monétaire, iii) l'*analyse économique* sous-tendant ces décisions, notamment les prévisions de la banque centrale et iv) le processus de prise de décisions des actions de politique monétaire. Le dernier domaine est surtout intéressant lorsqu'il s'agit de comités de politique monétaire où des voix divergentes ont pu se faire entendre mais ne trouve pas d'application directe dans notre modèle. Nous nous concentrerons alors sur les trois premiers.

Le premier implique la transparence sur la définition des objectifs de la politique monétaire et la possible hiérarchie entre eux. Les objectifs peuvent être quantifiés, comme c'est le cas en régime de ciblage de l'inflation, et peuvent être assortis d'un horizon temporel sur lequel ils doivent être atteints. Les décisions de politique monétaire sont le plus souvent annoncées et étayées publiquement dès qu'elles sont rendues. Certaines banques centrales donnent un guidage (*guidance*) en annonçant leurs projections de taux d'intérêt en fonction des conditions macroéconomiques anticipées, et ce à un

horizon plus ou moins long. D'autres, comme la BCE ou la BoE, restent volontairement moins précises et les mots prononcés lors de conférences de presse servent alors de signaux pour anticiper les futures décisions de politique monétaire. La transparence sur l'analyse économique porte essentiellement sur l'analyse prospective qui sous-tend les projections d'inflation et de niveau d'activité économique de la banque centrale. Toutes les banques centrales de l'étude de Minegishi & Cournède (2009) publient de telles projections, en rendant compte également des hypothèses sous-jacentes, à une fréquence qui varie de 3 à 6 par an. Ces projections concernent un horizon de 2 à 3 ans et sont données à une fréquence qui va du trimestre à l'année. Certaines banques centrales communiquent également les incertitudes entourant leurs projections.

Conformément à ces observations, nous retenons les sept degrés de transparence suivants (résumés dans le tableau 4.3). Le degré 0 de transparence (opacité) est composé de  $I = 2$  signaux : il ne donne aucune information aux agents autres que le niveau et la variation du taux d'intérêt nominal. En effet, lorsque la banque centrale est opaque, l'instrument (ici le taux d'intérêt  $i$ ) a une valeur informative. Il peut alors émerger un *biais d'opacité* (Walsh (2007)) qui contraint les réactions de la banque centrale. Le degré zéro a donc été introduit pour tester son existence dans notre modèle. A mesure que le degré de transparence s'accroît, les agents disposent de plus en plus d'informations venant de la banque centrale<sup>17</sup>. Avec un degré 1, les agents disposent en plus des objectifs de la politique monétaire (écart de l'inflation à la cible et écart de production), ils ont alors  $I = 4$  signaux. Ce degré de transparence correspond à une situation où les autorités monétaires communiquent la cible d'inflation et celle d'écart de production. Rappelons qu'il s'agit du minimal pour un régime de ciblage de l'inflation. Les degrés de transparence suivants permettent d'introduire également une politique de transparence plus large.

Pour ce faire, nous supposons que la banque centrale utilise un modèle VAR de prévision de l'inflation et de l'écart de production. En suivant par exemple Orphanides & Williams (2007), ce modèle est estimé récursivement par les moindres carrés à gain constant (voir Sargent (1999) ou Evans & Honkapohja (2001) pour les propriétés de cet algorithme). Une telle spécification permet surtout de prendre en compte des changements structurels en donnant davantage de poids aux observations récentes.

Soit  $\mathbf{Y}_t = (\pi_t, x_t)$  le vecteur  $(1 \times 2)$  des variables en  $t$ . Soit  $\mathbf{X}_t = (1, \pi_{t-1}, \dots, \pi_{t-L}, x_{t-1}, \dots, x_{t-L})$  le vecteur de dimension  $(2L+1 \times 1)$  incluant une constante et les  $L$  retards de  $\mathbf{Y}$  qui servent de régresseurs au modèle de prévision. Soit  $\mathbf{c}_t$  le vecteur de dimension  $(2L + 1 \times 2)$  des coefficients du modèle de

---

17. Ce dispositif est proche de celui d'Eusepi & Preston (2010), dans lequel les agents estiment un modèle VAR pour anticiper la valeur des variables endogènes dans un modèle NK, et les informations de la banque centrale imposent des restrictions sur les coefficients de ce modèle VAR, rendant l'estimation plus précise.

inputs dans le RNA	détails	Degré de transparence						Caractérisation de la transparence	
		0	1	2	3	4	5	6	
$i_t$	niveau courant du taux d'intérêt nominal	X	X	X	X	X	X		opacité
$\Delta i_t$	variation du taux d'intérêt nominal <sup>a</sup>	X	X	X	X	X	X		transparence sur les objectifs
$x(t)$	écart de production courant	X	X	X	X	X	X		transparence sur les objectifs
$\pi_t - \pi^T$	écart d'inflation courant à la cible <sup>b</sup>	X	X	X	X	X	X		transparence sur les décisions (guidance)
$\Delta i^{a,CB}$	la banque centrale prévoit-elle une tendance croissante ou non du taux d'intérêt nominal à $horizon$ périodes?			X	X	X	X		transparence sur les décisions (guidance)
$i_{t+horizon}^{a,CB}$	taux d'intérêt nominal prévu par la banque centrale à $horizon$ périodes			X	X	X	X		transparence sur l'analyse économique
$\Delta \pi^{a,CB}$	la banque centrale prévoit-elle une tendance croissante ou non du taux d'inflation à $horizon$ périodes?				X				transparence sur l'analyse économique
$\Delta x^{a,CB}$	la banque centrale prévoit-elle une tendance croissante ou non de l'écart de production à $horizon$ périodes?				X				transparence sur l'analyse économique
$\pi_{t+horizon}^{a,CB}$	taux d'inflation prévu par la banque centrale à $horizon$ périodes				X	X			transparence sur l'analyse économique
$x_{t+horizon}^{a,CB}$	écart de production prévu par la banque centrale à $horizon$ périodes				X	X			transparence sur l'analyse économique
$e_{\pi^{a,CB}}$	erreur de prévision de l'inflation <i>a posteriori</i>				X				l'analyse économique
$e_{x^{a,CB}}$	erreur de prévision de l'écart de production <i>a posteriori</i>				X				l'analyse économique

Tableau 4.3 – Ensemble des signaux distillés par la banque centrale intégrés au RNA des ménages

a. La notation  $\Delta x$  désigne la variation de la variable  $x$  entre les périodes  $t - 1$  et  $t$ .

b. Ceci revient à communiquer explicitement la cible  $\pi^T$ , la cible étant une constante, elle ne peut être directement intégrée en tant qu'*input* dans le RNA.

prévision. Les paramètres  $c$  du modèle estimé par les moindres carrés à gain constant peuvent s'écrire :

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{c}_{t-1} + \kappa \mathbf{R}^{-1} \mathbf{X}_t (\mathbf{Y}_t - \mathbf{X}_t^T \mathbf{c}_{t-1}) \quad (4.5)$$

et

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{R}_{t-1} + \kappa (\mathbf{X}_t \mathbf{X}_t^T - \mathbf{R}_{t-1}) \quad (4.6)$$

où  $\mathbf{R}$  est la matrice de corrélation et  $\kappa > 0$  représente un (faible) gain constant. Plus  $\kappa$  est faible, plus l'ajustement du VAR est inertiel. Les erreurs du modèle de prévision *a posteriori* sont données par :

$$\mathbf{e}_t = \mathbf{Y}_t - \mathbf{X}_t^T \mathbf{c}_t \quad (4.7)$$

Grâce à ce modèle, la banque centrale obtient des prévisions de l'inflation et de l'écart de production, qu'elle peut extrapoler à *horizon* périodes. Puis, en utilisant les valeurs de  $\pi_{t+horizon}^{CB}$  et  $x_{t+horizon}^{CB}$ , la banque centrale obtient par la règle de politique monétaire (4.4) la prévision du niveau du taux d'intérêt nominal  $i_{t+horizon}^{CB}$  qu'elle prévoit de fixer à *horizon* périodes (Williams (2010)). Certes, la banque centrale n'utilise pas directement ses prévisions d'inflation et d'écart de production pour fixer son instrument, puisque la règle de politique monétaire (4.4) implique le niveau courant des variables. Cette forme de la règle est conservée ici dans un souci de cohérence avec les analyses précédentes, menées au chapitre 3 et en première partie de ce chapitre. Les agents ne peuvent donc pas déduire la règle de politique monétaire en observant ces prévisions. On doit plutôt interpréter la fourniture des prévisions comme la fourniture d'une information publique par un économètre, ou plus concrètement par un service de statistiques dans le modèle, chargé de publier des informations macroéconomiques. Ce dispositif est très proche de celui retenu par Haber (2008) pour formaliser les anticipations des agents dans un modèle macroéconomique à base d'agents. Un bruit, dû à l'erreur d'ajustement du modèle VAR, est inévitablement introduit, inhérent à toute forme de prévision. Les degrés de transparence 4 à 6, explicités ci-après, sont justement conçus pour établir si la fourniture de ces informations, même bruitées, aide les agents dans leurs prises de décision ou au contraire, ne fait qu'ajouter du bruit dans le processus de formation des anticipations, et détériore ainsi la stabilisation macroéconomique.

Sous les degrés 2 et 3 de transparence, on suppose que les agents connaissent également la prévision de la banque centrale du taux d'intérêt nominal ( $I = 5$ ). La banque centrale communique soit une *tendance* anticipée (croissante ou décroissante, degré 2), soit la *valeur* anticipée (degré 3). Avec les degrés 4 et 5, les autorités monétaires communiquent également les tendances anticipées de l'inflation et de l'écart de production (degré 4,  $I = 7$ ) ou les valeurs anticipées de ses objectifs (degré 5,  $I = 7$ ).

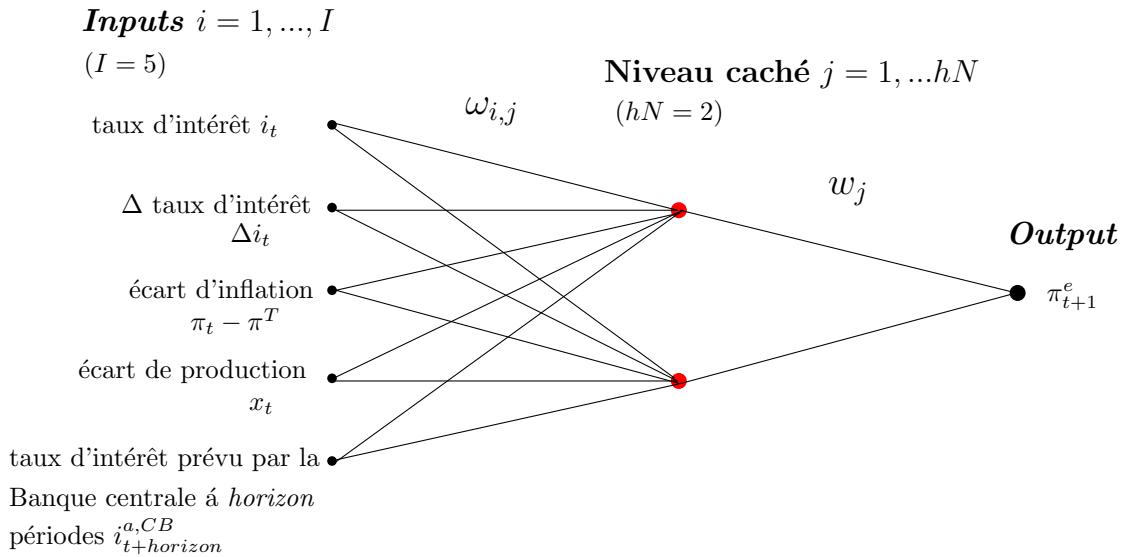


FIGURE 4.9 – Fonctionnement du modèle mental de chaque agent.

Le dernier degré (degré 6,  $I = 9$ ) est conçu pour modéliser le fait que la banque centrale communique sur les incertitudes sur ses projections : elle donne aux agents ses erreurs d'anticipations *a posteriori* concernant ses anticipations d'inflation et d'écart de production. Ces informations permettent de souligner le caractère conditionnel des projections des autorités monétaires.

Les niveaux 2 et 3 concernent la transparence sur les décisions de politique monétaire. La banque centrale donne un guidage aux agents à *horizon* périodes. Les niveaux 4, 5 et 6 décrivent la transparence sur l'analyse économique qui sous-tend les décisions de politique monétaire. De même, les projections de l'inflation et de l'écart de production sont données à *horizon* périodes. De plus, les niveaux 2 et 4 *versus* 3 et 5 permettent de confronter deux types de communication : une communication plutôt globale, sur une tendance générale et une communication très précise, sur les valeurs anticipées. Enfin, avec les degrés de transparence 2 à 6, nous supposons que la banque centrale communique ses anticipations toutes les *commRate* périodes. Cette hypothèse est introduite pour se conformer aux observations empiriques (cf. Minegishi & Cournède (2009)). Le but est de voir si différents degrés de transparence peuvent faire émerger des comportements différents et plus ou moins favorables à la stabilisation macroéconomique.

## II.2.2 Fonctionnement du RNA

Comme il a été mentionné plus haut, le RNA nous permet de doter les agents d'un comportement *prospectif*. Le RNA leur permet de former et d'affiner au cours du temps la correspondance (*mapping*) entre les informations de la banque centrale et la réalisation effective de l'inflation. Ce fonctionnement

illustre bien la politique de communication des autorités monétaires en termes de *management des anticipations*.

**Former une anticipation d'inflation à partir du RNA** La figure 4.9 illustre le RNA d'un agent dans le cas du degré 3 de transparence. La structure est composée des  $I = 5$  signaux ou *inputs*, un niveau caché composé de deux noeuds cachés et un output. Le niveau caché stocke les variables inobservables du modèle mental de l'agent et filtre les informations peu significatives. Le nombre de noeuds cachés  $hN$  a été choisi pour construire une architecture pyramidale ( $hN = \min\{2, \sqrt{I}\}$ , ici 2, cf. Masters (1993, pp. 176-177)). Il traduit la complexité du RNA, et donc du modèle mental de l'agent. Un minimum de deux noeuds cachés permet d'assurer une structure non-linéaire du RNA. L'approximation des liens entre les *inputs* et l'*output* est obtenue en spécifiant les poids  $\omega_{i,j}$  et  $w_j$ . Ces poids sont initialisés aléatoirement pour chaque agent et sont, par la suite, ajustés en fonction des flux d'*inputs* et d'*output* que le RNA reçoit successivement. Le RNA affine ainsi les relations entre les signaux de la banque centrale et l'anticipation d'inflation correspondante : on parle de l'entraînement du RNA (voir encadré 4.2). Concrètement, à l'issue de chaque période  $t$ , chaque ménage doit former une anticipation du taux d'inflation qui prévaudra entre la période  $t$  et la période suivante  $t + 1$ . Il entre (*feed*) dans son RNA les signaux provenant de son environnement en  $t$ , notés  $o_i$ ,  $i = 1, \dots, I$ , et le RNA lui renvoie un anticipation d'inflation :

$$\pi_{t+1}^e = S \left( \sum_{j=1}^{hN} w_j \left( \sum_i^n \omega_{i,j} o_i \right) \right), \quad (4.8)$$

où la fonction  $S()$  est dite fonction d'activation et permet de contenir les valeurs des noeuds entre 0 et 1. Nous retenons la fonction d'activation la plus répandue – la fonction sigmoïde  $S(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)}$  – qui présente des propriétés intéressantes pour l'entraînement du RNA, voir encadré 4.2. La période  $t+1$  se réalise et le ménage connaît l'inflation effective. L'erreur entre l'inflation prédictive et l'inflation observée permet d'ajuster les poids  $\omega_{i,j}$  et  $w_j$  du RNA. On appelle cette étape l'entraînement (*training*). Comme chaque ménage a son propre RNA et que les poids  $\omega$  et  $w$  sont initialisés aléatoirement (entre -0.05 et 0.05) pour chacun, chaque ménage forme une anticipation distincte de celles des autres<sup>18</sup>.

---

18. Cependant, après l'initialisation, les RNA de chaque agent sont tous nourris avec des variables agrégées, communes à chacun. Dans une telle situation, les poids des RNA de chaque agent devraient s'harmoniser au cours de la simulation.

### Encadré 4.2 – Apprentissage d'un réseau de neurones par rétropropagation des erreurs (*backpropagation*)

Le RNA est entraîné par la méthode de rétropropagation des erreurs (voir Rumelhart et al. (1986)). C'est une méthode d'apprentissage supervisé très répandue pour ce type de réseau de neurones et fiable.

A la fin de chaque période  $t$ , chaque ménage acquiert un nouveau point d'observations constitué des valeurs en  $t - 1$  des  $I$  *inputs*, notées  $\{o_i\}_{i=1..I}$ , et de l'*output* effectivement obtenu à la période suivante  $t$ , i.e.  $\pi_t$ . Cet *output* est confronté à l'inflation prédictive par le RNA sur la base de ces *inputs*. Les poids  $\omega_{i,j}$  et  $w_j$  du RNA sont ajustés dans le but de réduire l'erreur de prédiction. La mesure de l'erreur la plus commune, retenue également ici, est l'erreur quadratique moyenne, notée  $E$ . En effet, avec une fonction d'activation sigmoïde

$$S(x) = \frac{1}{1 + \exp^{-x}}$$

on peut facilement obtenir les dérivées de  $E$  par rapport à chaque poids (comme  $\frac{\partial S}{\partial x} = S(x)(1 - S(x))$ ) et ainsi ajuster chaque poids selon un algorithme semblable à celui du gradient. Ces dérivées sont calculées du noeud terminal d'*output* vers les noeuds d'*inputs* de départ, on parle donc de rétropropagation des erreurs. Cette démarche est détaillée ci-dessous. Elle consiste en quatre étapes :

- i) calculer la prévision du RNA (*feed-forward computation*) en fonction d'un ensemble d'*inputs* ou *pattern*,
- ii) rétropropager l'erreur au noeud d'*output*,
- iii) rétropropager l'erreur au niveau caché
- et iv) ajuster les poids du RNA.

i) Soit un RNA avec  $i = 1, \dots, I$  *inputs*,  $j = 1, \dots, hN$  noeuds cachés et un noeud d'*output*. La figure 4.9 décrit la structure d'un RNA pour le degré 3 de transparence ( $I = 5$  et  $hN = \lfloor \sqrt{5} \rfloor = 2$ ). Nous avons donc  $hN$  poids  $w_j$  à ajuster entre le niveau caché et l'*output* et  $I \times hN$  poids  $\omega_{i,j}$  à ajuster entre les *inputs* et le niveau caché. Notons  $W^1 = \{\omega_{i,j}\}$  la matrice de dimension  $(I \times hN)$ , où l'élément de la  $i^{\text{ème}}$  ligne et de la  $j^{\text{ème}}$  colonne représente le poids liant l'*input*  $i$  et le noeud caché  $j$  et  $W^2 = \{w_j\}$  la matrice de dimension  $(hN \times 1)$ , où l'élément de la  $j^{\text{ème}}$  ligne représente le poids liant le noeud caché  $j$  à l'*output*. A la période  $t$ , les nouvelles observations sont présentées au RNA, soit  $o = \{o_i\}$  le vecteur de dimension  $(1 \times n)$  de ces *inputs*. La valeur  $V_j$  qui arrive des *inputs* à chaque noeud caché  $j$  est donnée par :

$$V_j = \sum_{i=1}^I \omega_{i,j} o_i \tag{4.9}$$

Soit le vecteur  $oW^1$  de dimension  $(1 \times hN)$  de ces valeurs. Chaque valeur  $V_j$  est transformée par la fonction sigmoïde : l'*output* à chaque noeud caché  $j$  est donc donné par  $o_j^1 = S(V_j)$ . On définit le vecteur  $(1 \times hN)$  des valeurs transformées qui arrivent aux noeuds cachés par  $o^1 = \{o_j^1\}$ . La valeur  $o^2$  qui arrive ensuite du niveau caché à l'*output* est donnée par le scalaire  $o^1 W^2$ . La valeur prédite par le RNA pour les *inputs*  $o$  est alors  $o^2$  et l'environnement a renvoyé à l'agent, à la période suivante  $t+1$ , la valeur effective de l'*output*, notée  $T$ . On parle d'apprentissage supervisé (*supervised*) dans la mesure où l'*output* effectif  $T$  est connu. On calcule l'erreur quadratique moyenne du RNA :  $E = \frac{1}{2}(o^2 - T)^2$ .

ii) Les dérivées partielles de l'erreur par rapport aux poids  $w_j$  sont alors calculées :

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial w_j} &= \frac{\partial E}{\partial o^2} \times \frac{\partial o^2}{\partial w_j} \\ &= (o^2 - T)o_j^1 \equiv \delta^2 o_j^1\end{aligned}$$

où nous définissons  $\delta^2$  l'erreur propagée entre l'*output* et le niveau caché.

iii) Les dérivées partielles de l'erreur par rapport aux poids  $\omega_{i,j}$  sont ensuite calculées :

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial \omega_{i,j}} &= \frac{\partial E}{\partial o^2} \times \frac{\partial o^2}{\partial o_j^1} \times \frac{\partial o_j^1}{\partial V_j} \times \frac{\partial V_j}{\partial \omega_{i,j}} \\ &= \delta_2 w_j o_j^1 (1 - o_j^1) o_i \equiv \delta_j^1 o_i\end{aligned}$$

où nous définissons  $\delta_j^1$  l'erreur propagée entre le noeud caché  $j$  et les *inputs*.

iv) Les poids sont ensuite ajustés dans le sens négatif du gradient :  $\begin{cases} \Delta w_j = -\tau o_j^1 \delta^2 \\ \Delta \omega_{i,j} = -\tau o_i \delta_j^1 \end{cases}$

où  $\tau > 0$  est un paramètre assimilable à un taux d'apprentissage.

Dans notre modèle, le RNA est entraîné avec les *windowSize* dernières observations *inputs/output*. Chacune de ces observations constitue un exemple (*pattern*). Le passage de toutes ces observations dans le RNA et la correction des poids qui s'en suit à chaque fois est appelée une époque (*epoch*). A chaque période, ce passage est répété un nombre *numEpoch* de fois. Il faut trouver un compromis entre *numEpoch* et  $\tau$ , la fraction de l'erreur qui est corrigée à chaque passage, pour que la correction soit progressive pendant chaque passage, mais suffisante pour projeter la totalité de l'erreur sur les coefficients. A cet égard, nous fixons  $\tau = 0.1$  et *numEpoch* = 25. Parfois, le taux d'apprentissage  $\tau$  est décroissant, et non pas fixe (voir Masters (1993), Heinemann (2000)). Nous ne retenons pas cette caractéristique dans la mesure où, dans notre modèle, le RNA ne cherche pas à approximer une fonction compliquée mais stable. Les relations entre les informations de la banque centrale et les anticipations d'inflation peuvent évoluer en fonction des caractéristiques de l'environnement dans lequel elles sont données. Pour cette raison, le RNA doit être capable d'une adaptation continue et nous choisissons un taux d'apprentissage constant. Remarquons que pour cette même raison, un algorithme des moindres carrés à gain constant est parfois préféré à un gain décroissant dans la littérature sur l'apprentissage économétrique.

**Entraînement du RNA** Pour entraîner le RNA, nous lui donnons des exemples ou *patterns*, constitués chacun d'une série de valeurs d'*inputs* (i.e. les signaux de la banque centrale à une période  $t$ ) et de la valeur de l'*output* (i.e. de l'inflation  $\pi_{t+1}$ ) effectivement obtenue. Nous retenons ces séries pour les *windowSize* dernières périodes, le RNA est donc entraîné avec *windowSize* exemples à chaque période. Nous fixons la valeur de *windowSize* à 5 fois le nombre de poids à mettre à jour, soit *windowSize* =  $5 * (I + 1) \times hN$  (Mehrotra et al. (1997, pp. 86-88)). A chaque entraînement, ces valeurs sont entrées un certain nombre de fois dans le RNA (une itération étant dite une époque, *epoch*, et le nombre de ces itérations désigné par *numEpoch*) pour corriger l'erreur obtenue entre les *outputs*

observés et les *outputs* prédits (on parle de rétropropagation des erreurs). A chaque passage, les poids  $\omega_{i,j}$  et  $w_j$  sont ajustés de sorte de corriger une fraction  $\tau$  de l'erreur. Ce processus d'apprentissage vise à adapter de mieux en mieux le RNA à l'environnement. Le détail exact de cette procédure est donné à l'encadré 4.2. Notons que c'est véritablement le processus d'entraînement qui détermine la pertinence des *inputs* au regard de la formation de l'anticipation d'inflation de chaque agent. Si un *input*  $i$  s'avère non déterminant pour prévoir la valeur de l'*output*, ses poids  $\omega_{i,j}$  tendent vers zéro.

## II.3 Transparence et performances macroéconomiques

Nous comparons les performances macroéconomiques – stabilisation de l'inflation autour de sa cible et de la production autour de son niveau potentiel – à travers les sept degrés de transparence de la banque centrale définis ci-dessus (tableau 4.3, page 204). Pour ce faire, nous procédons en deux étapes. D'abord, nous nous focalisons sur l'effet de la transparence sur les résultats de la banque centrale en fixant la règle de politique monétaire (voir tableau 4.4, page 212, configuration 7). Nous dérivons ensuite la politique monétaire optimale en fonction du degré de transparence adoptée par la banque centrale (configuration 8).

### II.3.1 Analyse à politique monétaire fixée (configuration 7)

Le tableau 4.4 donne les conditions des simulations dans cette configuration. Les valeurs des paramètres structurels de l'économie sont choisies comme précédemment, soit en fonction des valeurs couramment retenues dans la littérature, soit en fonction des résultats de l'analyse de sensibilité menée au chapitre 3. Les valeurs des paramètres du RNA ont été explicitées ci-dessus. Nous retenons une règle fixe de politique monétaire, donnée par Taylor (1993), i.e.  $\phi_\pi = 1.5$  et  $\phi_x = 0.5$ , ainsi qu'une cible d'inflation de 2%. Le VAR de la banque centrale implique 4 retards, avec un gain fixé à 0.02 (Orphanides & Williams (2005)). Interprétant les périodes de notre modèle comme des trimestres, la fréquence de communication des prévisions des autorités monétaires varie de 1 (toutes les périodes) à 4 (tous les ans). De même, l'horizon de prévision varie de 1 (pour la période suivante) à 8 (deux ans, ce qui correspond à des prévisions de long terme), incluant la possibilité de prévision à moyen terme (4 périodes, soit un an). Ces hypothèses sont cohérentes avec les études empiriques menées sur les stratégies de transparence des banques centrales (voir notamment Minegishi & Cournède (2009)). Nous retenons enfin trois environnements d'apprentissage, tout comme à la section I, c'est-à-dire : un environnement stable caractérisé par  $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}\} = \{0.05, 0.05\}$ , un environnement dans lequel les effets de second-tour sont forts ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}\} = \{0.05, 0.4\}$ ) ainsi qu'un environnement où le canal de la consommation est fortement perturbé, i.e.  $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}\} = \{0.4, 0.05\}$ . La première

configuration est désignée comme le niveau de chocs 0 dans la suite de l'analyse, la seconde comme le niveau 1 et la troisième comme le niveau 2. En particulier, nous avons vu précédemment comment les chocs  $\sigma_{mutW}$  peuvent s'interpréter comme des chocs de prix. Cette interprétation est confirmée par l'étude qui suit.

Nous avons donc trois niveaux de chocs, trois niveaux de fréquence de communication ainsi que trois niveaux d'horizon des prévisions de la banque centrale et 7 degrés de transparence. Nous avons alors  $3 \times 3 \times 3 \times 7 = 189$  configurations, répétées chacune 20 fois, soit un total de 3780 runs. Les simulations sont initialisées comme précédemment et conduites sur 800 périodes, à la seule différence que, compte tenu du coût computationnel de cette version avec RNA, nous ne retenons que  $n = 100$  consommateurs. Dans chaque configuration, et pour chaque run, les variables sont sauvegardées toutes les 25 périodes à partir de la centième, soit 29 observations par run et un total de 109620 observations pour chaque variable.

Après avoir présenté quelques statistiques descriptives (voir tableaux D.6, D.7 et D.8 en annexe IV), nous procédons à une analyse de la variance (ANOVA) de l'écart d'inflation ainsi que de l'écart de production. Pour l'ANOVA, chacune des variables-réponses est mesurée par sa moyenne sur les 600 dernières périodes de chaque run (les 200 premières étant retirées pour limiter les effets de l'initialisation sur les résultats). Nous avons alors 3780 observations de l'écart d'inflation et de l'écart de production et 4 facteurs : le niveau de choc (0, 1 ou 2), l'horizon des projections de la banque centrale (1, 4 ou 8), la fréquence de leur communication (1, 2 ou 4) et le niveau de transparence (de 0 à 6).

Tout d'abord, les statistiques descriptives données en annexe IV, page 293, obtenues sur l'ensemble des données, tous degrés de transparence et de niveaux de chocs confondus, appellent plusieurs remarques générales (les étiquettes des variables-réponses sont les mêmes que celles données au tableau 3.3, page 134 au chapitre 3, auxquelles nous ajoutons la moyenne de l'écart de production *meanOutputGap* ainsi que sa variance *varOutputGap*). La moyenne des coefficients d'indexation  $\gamma_w$  dans la population de ménages est toujours supérieure à l'unité et les anticipations d'inflation sont presque systématiquement supérieures à la cible. En conséquence, l'écart d'inflation moyen est pratiquement toujours positif. Comme on peut s'y attendre, plus les chocs d'apprentissage  $\sigma_{mutW}$  sont forts, plus les comportements d'indexation sont forts et l'inflation se trouve d'autant supérieure à la cible. Les anticipations moyennes des ménages semblent très corrélées à l'inflation moyenne effective, suggérant que le canal des anticipations qui passe par les deux composantes comportements d'indexation et anticipations d'inflation est déterminant dans la réalisation de l'objectif d'inflation : *l'inflation est un phénomène prospectif* dans le modèle.

Le tableau 4.5, page 215, fournit des indications supplémentaires sur le fonctionnement général du

Paramètres	Nom dans R-Project	Domaines de variation (7)	Domaines de variation config. (8)	Description
<i>Paramètres structurels de l'économie</i>				
$\alpha \in [0,1[$	alpha	0.25	0.25	paramètre de rendements d'échelle
$\mu \geq 0$	mu	0.10	0.10	marge appliquée sur le coût marginal
$b_0 \geq 0$	initWealth	10	10	richesse initiale individuelle
$\varepsilon > 0$	epsilon	0.01	0.01	taux d'ajustement de la demande de travail
$\rho$	rho	0.5	0.5	degré de lissage des moyennes mobiles
<i>Contraintes introduites sur le comportement des agents</i>				
$\underline{k} \geq 0$	minCRate	0.5	0.5	taux de consommation minimal
$k \geq 1$	maxCRate	1.5	1.5	taux de consommation maximal
<i>Paramètres du comportement des ménages</i>				
$P_{mut} \in ]0, 1]$	probMut	0.02	0.02	probabilité de mutation de l'algorithme génétique
$P_{init} \in ]0, 1]$	probLimit	0.1	0.1	probabilité d'imitation de l'algorithme génétique
$\sigma_{mutW} > 0$	mutSpaceW	{0.05, 0.4}	0.4	pas des mutations, i.e. espace de tirage des stratégies $\gamma_W$
$\sigma_{mutK} > 0$	mutSpaceK	{0.05, 0.4}	0.05	pas des mutations, i.e. espace de tirage des stratégies $\gamma_K$
$hN$	hidNodes	$\min\{2, \lfloor \sqrt(I) \rfloor\}$	$\min\{2, \lfloor \sqrt(I) \rfloor\}$	nombre de noeuds cachés des RNA
$windowSize$	windowSize	$5 * (I + 1) \times hN$	$5 * (I + 1) \times hN$	fenêtre d'observations passées
$numEpoch$	numEpoch	25	25	nombre d'itérations
$\tau$	learnRate	0.1	0.1	taux d'ajustement des poids en fonction des erreurs
<i>Paramètres de la politique monétaire</i>				
$\phi_\pi \geq 0$	coeffInRate	1.5	{0, 0.5, 1, 1.5, 2}	coefficient de réaction à l'écart d'inflation
$\phi_x \geq 0$	coeffX	0.5	{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1}	coefficient de réaction à l'écart de production
$\pi^T \geq 0$	infTarget	0.02	{0.01, 0.02, 0.04}	cible d'inflation
$commRate \geq 0$	commRate	{1, 2, 4}	1	fréquence de communication des prévisions de la BC
$horizon \geq 0$	horizon	{1, 4, 8}	{4, 8}	horizon des prévisions de la BC
$L \geq 0$	nbLags	4	4	nombre de retards dans le VAR de la banque centrale
$\kappa \geq 0$	gain	0.02	0.02	gain dans l'algorithme des moindres carrés récursifs

Tableau 4.4 – Ensemble des 22 paramètres du modèle augmenté des anticipations par RNA

modèle (à nouveau, les étiquettes des variables sont les mêmes que celles données au tableau 3.3, et le tableau regroupe l'ensemble des données). La très forte corrélation entre les comportements d'indexation et l'écart d'inflation (mesuré en valeur absolue) ainsi qu'avec les anticipations d'inflation confirme cette remarque. De plus, comme établi à l'analyse de sensibilité au chapitre 3, la variance et la moyenne de l'inflation apparaissent fortement et positivement corrélées. Ainsi, une plus forte variabilité des comportements d'indexation et des anticipations d'inflation parmi les ménages entraîne globalement des performances macroéconomiques moindres (cf. niveau de choc 1). Au contraire, la variabilité des comportements de substitution est associée à une meilleure stabilisation de l'économie, ce qui peut paraître contre-intuitif. Ceci vient du fait que cette variabilité est plus forte dans la configuration 2 de chocs ( $\sigma_{mutK} = 0.4$ ) mais cette configuration ne semble pas entraîner une détérioration de la réalisation des objectifs de la politique monétaire par rapport à la configuration de choc 0 ( $\sigma_{mutK} = 0.05$ ). Alors que les coefficients moyens  $\gamma_k$  sont bien plus volatiles dans la configuration de choc 2 (compris environ entre 0.2 et 0.5) que dans la configuration 0 (compris environ entre 0.45 et 0.5), les statistiques descriptives ne diffèrent pas significativement (cf. tableaux D.6 et D.8 annexe IV). Comme on l'a vu au chapitre 2, ces chocs affectent le canal de la consommation de la politique monétaire. Si on les assimile à une incertitude sur ce canal de transmission, ils ne provoquent pas d'arbitrage entre les deux objectifs des autorités monétaires. La règle de politique monétaire postulée ( $\phi_\pi = 1.5$  et  $\phi_x = 0.5$ ) implique une réaction forte à l'écart d'inflation, qui peut suffire à stabiliser l'économie en présence de ce type d'incertitude.

L'ANOVA confirme clairement ces analyses. Ses résultats sont reportés au tableau 4.6 et les effets marginaux significatifs sont donnés par les figures 4.10<sup>19</sup>. Le niveau des chocs ainsi que le degré de transparence sont des déterminants très significatifs des performances de la politique monétaire. Les figures 4.10 nous montrent très clairement que l'ampleur des chocs sur le comportement de substitution  $\sigma_{mutK}$  ne joue pas de rôle significatif sur la dynamique macroéconomique. Il n'en va pas de même pour les chocs sur le comportement d'indexation  $\sigma_{mutW}$ . Ceux-ci sont explicitement assimilables à des chocs de prix, créant un arbitrage entre les deux objectifs de la banque centrale : l'écart de production est fortement négatif alors que l'inflation est fortement supérieure à sa cible. Dans ce cas, la dynamique inflationniste est essentiellement guidée par les anticipations d'inflation, *via* les coûts salariaux (premier terme de l'équation (2.87) au chapitre 2, page 106) et non par les conditions sur le marché du travail (second terme de l'équation (2.87)) : les deux objectifs ne varient pas de pair.

L'hypothèse de l'existence d'un *biais d'opacité* dans le modèle est très nettement confirmée par

---

19. L'écart de production  $x$  est donné par  $x = \frac{Y(t) - Y^n}{Y^n} \leq 0$ , ce qui explique les valeurs négatives reportées alors que les tableaux en annexe IV et le tableau 4.5 donnent  $x = \frac{Y^n - Y(t)}{Y^n} \geq 0$ .

les figures 4.10c, 4.10d, 4.10a et 4.10b. Le degré 0 de transparence correspond à celui dans lequel la banque centrale ne communique aucune information et les agents forment leurs anticipations d'inflation à partir du niveau et des variations de son instrument – le taux d'intérêt nominal. Les performances macroéconomiques, qu'il s'agisse de l'écart de production ou de l'écart d'inflation sont nettement détériorées par rapport aux autres degrés de transparence. Dans ce cas, lorsque la banque centrale ajuste le taux d'intérêt nominal, elle affecte inévitablement les anticipations d'inflation, puisque c'est la seule information dont les agents disposent pour tenter d'inférer une anticipation d'inflation. Cet effet perturbe l'effet de la politique monétaire sur le taux d'intérêt réel, qui est déterminant pour influencer la consommation des ménages. Le biais d'opacité existe quelle que soit la configuration de choc mais il est très clairement plus marqué en présence de chocs de prix de forte ampleur (niveau de choc 1, où  $\sigma_{mutW} = 0.4$ ). Notons à cet égard que les figures 4.10a et 4.10b confirment l'interprétation des chocs  $\sigma_{mutW}$  en termes de chocs de prix, impliquant un arbitrage entre les deux objectifs de la banque centrale. Dans ce cas, le canal des anticipations est fortement perturbé par l'apprentissage des agents et l'effet des anticipations d'inflation sur la dynamique inflationniste n'en est que renforcé. Il est intéressant de remarquer que dans ce cas, des degrés de transparence modérés (lorsque la banque centrale annonce ses objectifs et le niveau de l'instrument anticipé, *i.e.* degrés 2 et 3) délivrent des performances macroéconomiques supérieures à des degrés de transparence accrus (lorsque la banque centrale communique également ses prévisions d'inflation et d'écart de production, *i.e.* degrés 4, 5 et 6). Nous revenons en détail, dans la sous-section suivante, sur le degré de transparence optimale en face de ce type de chocs.

Notons que la fréquence de communication des prévisions de la banque centrale n'affecte pas du tout les performances macroéconomiques, ce qui n'est pas le cas de l'horizon des prévisions (figure 4.10e). En regardant son interaction avec le niveau de choc (figures 4.10f et 4.10g), il apparaît que son rôle n'est flagrant que dans le cas de chocs de prix forts (configuration de choc 1, dans laquelle  $\sigma_{mutW}$  vaut 0.4). Alors qu'un horizon de long terme (8 périodes) stabilise mieux l'écart de production, un horizon de moyen terme (4 périodes) parvient mieux à limiter l'écart d'inflation. Ce résultat dépend par ailleurs du degré de transparence de la banque centrale (figures 4.10c, 4.10d et 4.10e). Si la banque centrale ne communique que ses prévisions de taux d'intérêt (degrés 2 et 3), un horizon de moyen ou long terme (4 ou 8 périodes) limite les effets des chocs de prix sur l'écart de production. En revanche, si elle communique également ses prévisions d'inflation et d'écart de production (degré 4 à 6), il vaut mieux qu'elle le fasse à un horizon de court terme (pour la période suivante).

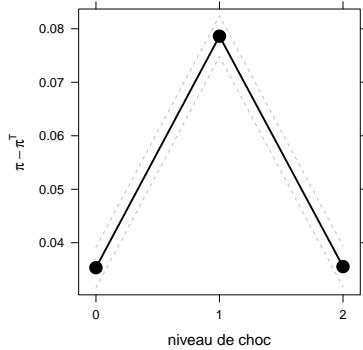
	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	<i>meanCoeffSubst</i>	<i>meanInfExpect</i>	<i>varInfExpect</i>	<i>varCoeffWageUpdate</i>	<i>varCoeffSubst</i>
<i>absInfGap</i>	0.7082*** (<2.2e-16)	-0.0928*** (<2.2e-16)	0.8731*** (<2.2e-16)	0.0541 *** (<2.2e-16)	0.1977** (<2.2e-16)	-0.1157*** (<2.2e-16)
<i>outputGap</i>	0.4089*** (<2.2e-16)	-0.0403*** (<2.2e-16)	0.4217*** (<2.2e-16)	0.0438*** (<2.2e-16)	0.1714** (<2.2e-16)	0.092*** (<2.2e-16)

Tableau 4.5 – Tests de corrélation de Pearson (109620 observations, *p-value* entre parenthèses)

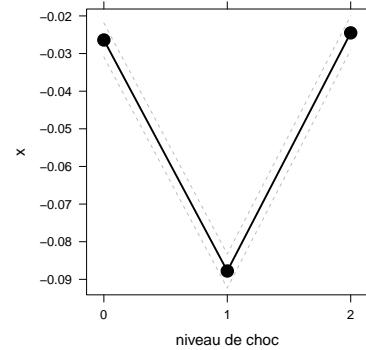
	$ \pi - \pi^T $				$\chi^2$					
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
choc	2	1.5669	0.7834	165.0379	< 2e-16 ***	2	3.2661	1.633	243.2791	< 2e-16 ***
transparence	6	1.3838	0.23063	48.5838	< 2e-16 ***	6	0.9063	0.151	22.5012	< 2e-16 ***
horizon	2	0.1658	0.0829	17.467	3e-08 ***	2	0.0097	0.0048	0.7190	0.4873
commRate	2	0.0063	0.0032	0.6680	0.5128	2	0.02	0.001	1.4885	0.2258
choc :transparence	12	0.9491	0.0791	16.6613	< 2e-16 ***	12	1.915	0.1596	23.7728	< 2e-16 ***
choc :horizon	4	0.3404	0.0851	17.928	1e-14 ***	4	0.2391	0.0598	8.903	4e-07 ***
transparence :horizon	12	0.0765	0.0063	1.3437	0.1862	12	0.1938	0.0161	2.4063	0.0042 **
choc :commRate	4	0.0146	0.0036	0.7713	0.5437	4	0.0405	0.0101	1.5101	0.1964
transparence :commRate	12	0.061	0.0051	1.0708	0.3804	12	0.0969	0.0081	1.2028	0.2744
horizon :commRate	4	0.0142	0.0036	0.7469	0.56	4	0.0395	0.0099	1.4724	0.2078
choc :transparence :horizon	24	0.1756	0.0073	1.5412	0.0447 *	24	0.4031	0.0168	2.5022	7e-05 ***
choc :transparence :commRate	24	0.0926	0.0039	0.8127	0.7242	24	0.1903	0.0079	1.1811	0.2467
choc :horizon :commRate	8	0.0236	0.0029	0.6208	0.7611	8	0.0668	0.0083	1.2431	0.2693
transparence :horizon :commRate	24	0.1513	0.0063	1.3278	0.1314	24	0.1654	0.0069	1.0269	0.4256
choc :transparence :horizon :commRate	48	0.2509	0.0052	1.1011	0.2939	48	0.2617	0.0055	0.8122	0.8189
Residuals	3591	17.0468	0.0048			3591	24.1055	0.0067		

Signif. codes : 0 '\*\*\*', 0.001 '\*\*', 0.01 \*, 0.05 :, 0.1 , 1

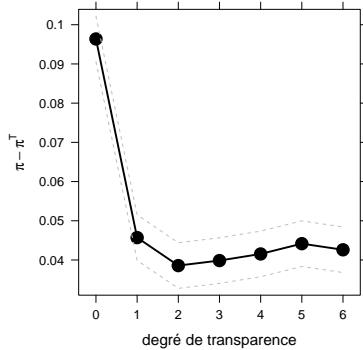
Tableau 4.6 – Analyse de la variance à 4 facteurs, 3780 observations



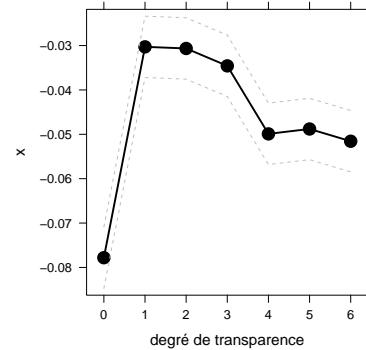
(a) Effet du niveau de choc sur l'écart d'inflation



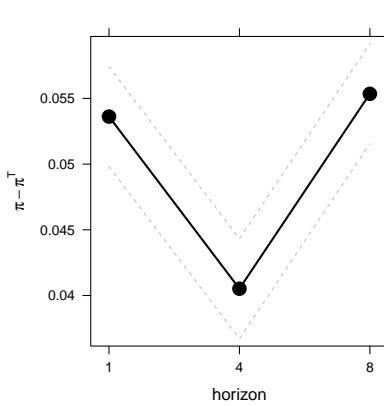
(b) Effet du niveau de choc sur l'écart de production



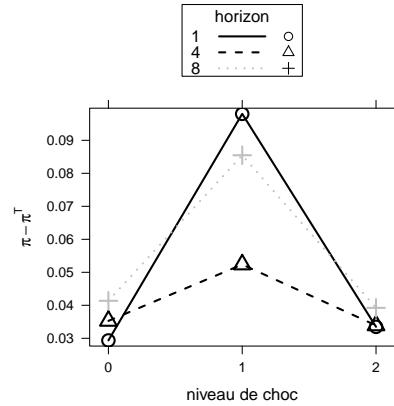
(c) Effet du degré de transparence sur l'écart d'inflation



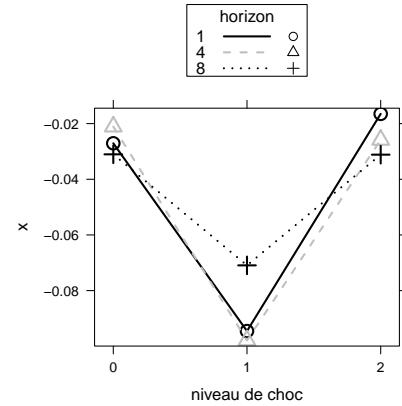
(d) Effet du degré de transparence sur l'écart de production



(e) Effet de l'horizon sur l'écart d'inflation



(f) Effet d'interaction entre l'horizon et le niveau de choc sur l'écart d'inflation



(g) Effet d'interaction entre l'horizon et le niveau de choc sur l'écart de production

(rappel : niveau de choc 0 ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.05\}$ ), niveau de choc 1 ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.4\}$ ) et niveau de choc 2 ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$ ) et degré de transparence (voir tableau 4.3)).

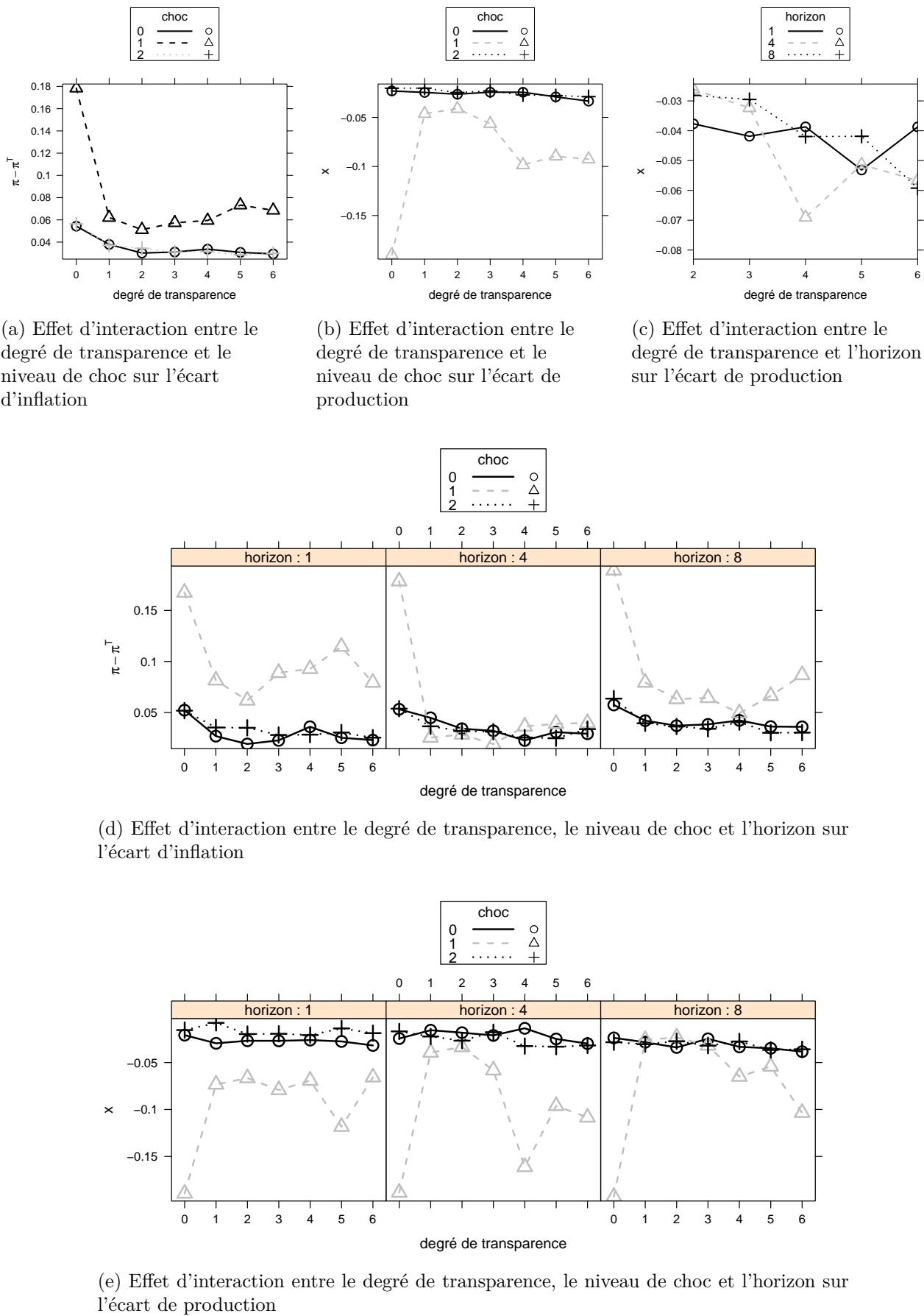


FIGURE 4.10 – Effets marginaux significatifs de l'ANOVA.

Cependant, *ne communiquer que sur ses objectifs et son instrument à un horizon relativement long est une stratégie bien meilleure en termes de stabilisation de l'écart de production et de l'écart d'inflation*. Dans ce cas, l'économie est pratiquement isolée de l'effet de ces chocs. Rappelons que ces deux paramètres – *horizon* et *commRate* – n'ont pas de sens dans le cas des degrés de transparence 0 et 1 car la banque centrale ne communique aucune prévision.

Nous parvenons ainsi à la proposition suivante :

**Proposition 14** *Les choix de transparence de la banque centrale n'affectent significativement les performances macroéconomiques qu'en présence de chocs assimilables à des chocs de prix de forte ampleur (chocs  $\sigma_{mutW}$ ). Dans ce cas,*

- *Si la banque centrale conduit une politique opaque, les agents n'infèrent leurs anticipations d'inflation qu'à partir du taux d'intérêt nominal. Cet effet, dit effet d'opacité, perturbe l'influence de la politique monétaire sur le taux d'intérêt réel et détériore considérablement la stabilisation macroéconomique.*
- *Ne communiquer que sur ses objectifs et son instrument à un horizon relativement long est une stratégie permettant d'isoler très significativement l'économie de ce type de choc.*

Cette proposition est illustrée par la figure 4.11. Trois dynamiques sont comparées, toutes trois dans un environnement de chocs de prix forts ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}\} = \{0.05, 0.4\}$ ) : celle résultant d'une politique opaque (degré 0), celles obtenues avec une annonce des objectifs et des prévisions du taux d'intérêt (degré 2) à un horizon respectivement d'une période et de quatre périodes. Dans les trois cas, le comportement d'indexation moyen dans la population d'agents est bien supérieur à l'unité et très volatile, reflétant l'effet des chocs d'apprentissage  $\sigma_{mutW}$ . Le degré 0 de transparence montre bien les performances macroéconomiques les moins satisfaisantes, tant sur le plan des niveaux que de la variabilité des anticipations d'inflation, de l'écart d'inflation et de l'écart de production : c'est le biais d'opacité discuté plus haut. La transparence sur les objectifs ainsi que l'annonce des prévisions de taux d'intérêt améliorent la stabilisation macroéconomique, notamment du point de vue de la volatilité mais l'inflation et l'écart de production se stabilisent à un niveau très supérieur aux objectifs. Lorsque les prévisions du taux d'intérêt sont communiquées à un horizon de moyen terme (4 périodes), les anticipations d'inflation restent bien mieux ancrées à la cible et surtout bien moins volatiles. En conséquence, les performances de la politique monétaire s'améliorent considérablement.

Pour finir, la proposition 14 est en concordance avec plusieurs travaux issus de la littérature récente. Par exemple, dans une étude empirique, Lamla & Lein (2011) analysent la compréhension et l'interprétation par les marchés financiers des signaux communiqués par la BCE sur la période 2000-2006. Ils montrent que ces acteurs réagissent surtout aux informations de la banque centrale concernant

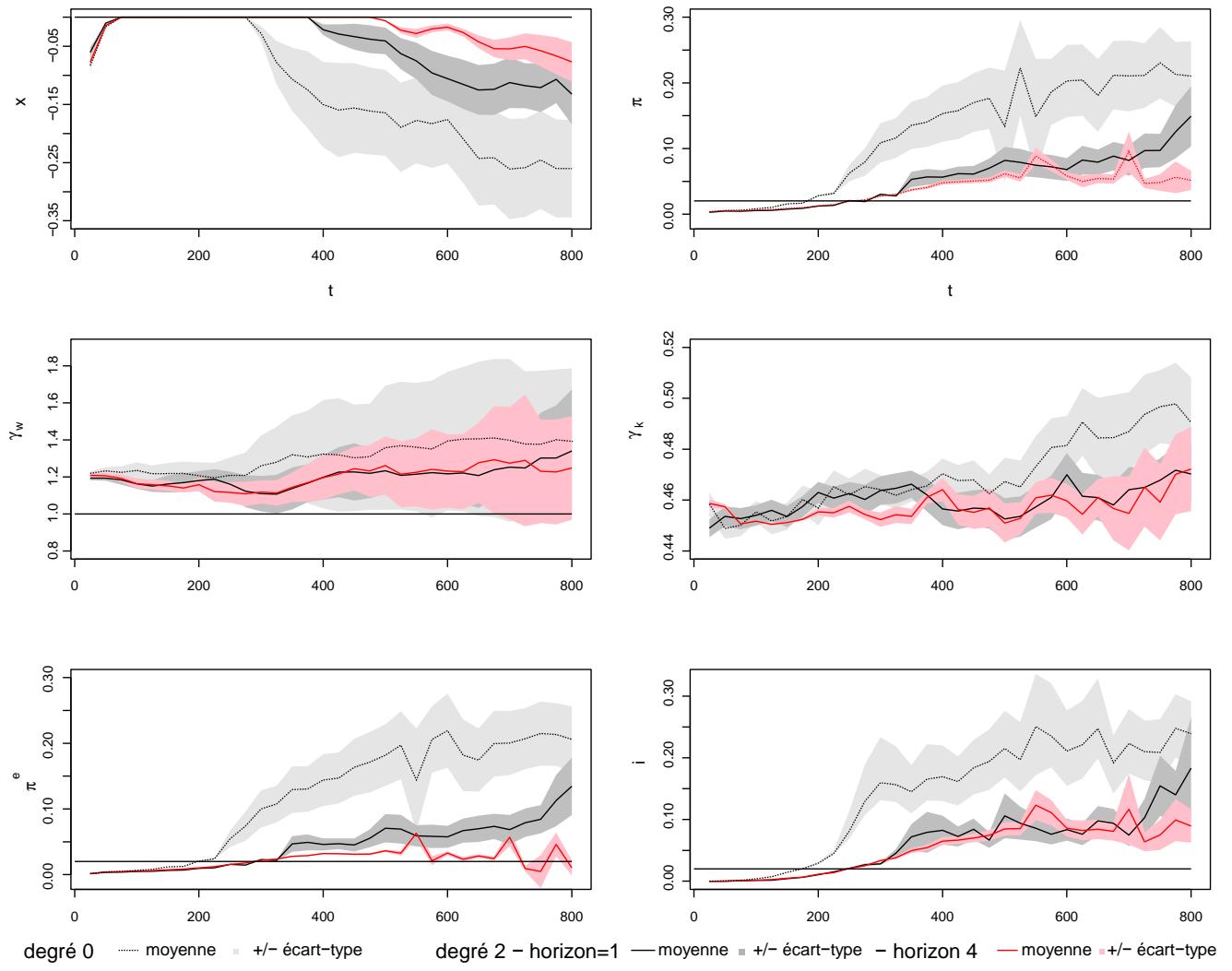


FIGURE 4.11 – Illustration : niveau de choc 1 ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}\} = \{0.05, 0.4\}$ ),  $commRate = 1$ , médiane et écart-type sur 20 réplications.

le niveau général des prix, alors qu'ils n'intègrent que de manière marginale les annonces concernant les perspectives économiques futures. En économie expérimentale, Kahneman (2003) montre que les marchés financiers sont susceptibles de surréagir aux signaux qu'ils reçoivent des autorités monétaires lorsque la quantité d'informations transmises dépasse leurs capacités à la traiter. Ces deux exemples, bien que d'essence différente, semblent indiquer qu'augmenter le nombre d'informations distillées par la banque centrale (dans notre modèle, ceci revient à augmenter le nombre d'*inputs* du RNA des agents) n'améliore pas nécessairement la qualité des prévisions des agents privés et peut même la détériorer. Ainsi, nous constatons qu'un degré de transparence modérée, impliquant que les agents n'utilisent pas les prévisions de la banque centrale sur les perspectives économiques futures, conduit aux meilleures performances macroéconomiques en présence de chocs de prix forts. Cependant, ce

résultat est obtenu dans une configuration précise de notre modèle, c'est-à-dire à politique monétaire donnée. Nous analysons maintenant la dynamique du modèle lorsque les coefficients de la règle de politique monétaire ne sont plus fixés *a priori*.

### II.3.2 Transparence et politique monétaire optimale

**Protocole de simulation** Dans cette dernière section, nous étudions les effets de la politique de la transparence de la banque centrale sur l'arbitrage entre stabilisation de l'inflation et stabilisation de l'écart de production dans notre modèle. Pour ce faire, nous nous plaçons dans un contexte de chocs assimilables à des chocs de prix forts, et ce pour deux raisons. D'une part, c'est dans cette configuration que l'arbitrage entre les deux objectifs de la politique monétaire se manifeste, comme les analyses précédentes dans ce chapitre l'ont confirmé. D'autre part, l'étude de la configuration 7 à la sous-section II.3.1 a révélé que les effets de la transparence sont les plus marquants dans cette configuration de chocs. Nous avons vu précédemment que ce sont les chocs  $\sigma_{mutW}$  qui, en affectant la variabilité des salaires nominaux et ainsi des coûts de production et du niveau du prix, reproduisent l'effet des chocs de prix dans le modèle. Nous posons donc  $\sigma_{mutW} = 0.4$  (et  $\sigma_{mutK} = 0.05$ ). Nous avons pour but d'interpréter les résultats dans un cadre d'analyse proche de celui de la courbe de Taylor (1979)<sup>20</sup>. Cette courbe décrit l'ensemble des couples variabilité de l'inflation-variabilité de l'écart de production qu'il est possible d'obtenir en fonction des préférences relatives des autorités monétaires pour l'un et l'autre des objectifs, lorsque la politique monétaire est fixée de manière optimale. Notre approche diffère quelque peu de celle-ci puisque nous ne pouvons dériver une politique monétaire optimale – c'est-à-dire la valeur des coefficients  $\phi_\pi$  et  $\phi_x$  qui minimise une fonction de perte de la banque centrale sous contrainte du modèle sous-jacent de l'économie. En effet, un tel modèle sous-jacent est inconnu dans notre approche à base d'agents. Nous adaptons alors la démarche de la courbe de Taylor à l'analyse de notre modèle de la façon suivante.

Pour chacun des sept degrés de transparence définis au tableau 4.4, page 212, nous faisons varier le coefficient de réaction à l'écart d'inflation entre 0 et 2 et celui de réaction à l'écart de production entre 0 et 1 :  $(\phi_\pi, \phi_x) \in \{0, 0.5, 1, 1.5, 2\} \times \{0, 0.25, 0.5, 0.75, 1\}$ , de sorte d'obtenir 25 couples de coefficients possibles. Chacune de ces 25 configurations est répétée 20 fois pour tenir compte du caractère non-déterministe du modèle. Nous retenons à chaque *run* la variance de l'inflation ainsi que celle de l'écart de production sur l'ensemble du *run* (en excluant les 100 premières périodes). Nous faisons ensuite la moyenne de ces variances parmi les 20 runs, de sorte d'obtenir 25 couples de variances de l'inflation et de l'écart de production relevés pour chaque couple de coefficients  $\phi_\pi$  et  $\phi_x$ . Nous comparons ensuite

---

20. Voir par exemple Cecchetti (1998), Chatterjee (2002) ou Branch et al. (2009) pour le détail de l'application de ce cadre d'analyse.

les 25 couples ainsi obtenus et éliminons les couples Pareto-dominés : il s'agit de tous les couples  $\{var(\pi)_i, var(x)_i\}$ ,  $i = \{1, \dots, 25\}$  tel qu'il existe au moins un couple  $\{var(\pi)_j, var(x)_j\}$ ,  $i \neq j$  parmi les 25 pour lequel on ait  $var(\pi)_i > var(\pi)_j$  et  $var(x)_i > var(x)_j$ . Les couples restants sont ainsi non Pareto-comparables, c'est-à-dire qu'ils décrivent des situations où l'inflation est plus volatile mais l'écart de production mieux stabilisé (ou inversement) que dans les autres couples retenus. Ces couples forment une frontière dite efficiente, dans la mesure où elle décrit les situations les plus favorables du point de vue de l'un ou l'autre des objectifs de la politique monétaire. A chacune de ces situations sont associées la valeur pour  $\phi_\pi$  et la valeur pour  $\phi_x$  mises en oeuvre. Ces valeurs correspondent à la politique monétaire optimale dans notre modèle. En fonction de sa préférence relative pour la stabilisation de l'écart de production par rapport à celle de l'inflation, la banque centrale choisit ainsi un couple de résultats de variabilité de l'inflation et de l'écart de production et la règle de politique monétaire qui lui correspond. Cette préférence est traduite par un poids  $\lambda \geq 0$  sur la stabilisation de l'écart de production dans la fonction de perte de la banque centrale :

$$\mathcal{L}(\pi, x, \lambda) = var(\pi - \pi^T) + \lambda var(x) \quad (4.10)$$

Ceci est effectué pour chacun des 7 degrés de transparence. Nous mettons d'abord en oeuvre le cas de référence dans lequel la cible d'inflation vaut 2% et l'horizon de prévision correspond à 4 périodes (*horizon* = 4). Nous testons ensuite la robustesse des résultats à une cible de 1 et 4% ainsi qu'à un horizon des prévisions plus long (8 périodes). Pour le reste, le protocole de simulation n'est pas changé. Nous obtenons ainsi la configuration 8, explicitée au tableau 4.4.

Nous présentons trois volets de résultats.

**Politique monétaire optimale et préférence pour la stabilisation de l'écart de production** La figure 4.12 nous montre comment la politique monétaire optimale évolue en fonction du poids relatif  $\lambda$  que la banque centrale place sur la stabilisation de l'écart de production. De manière générale, nous remarquons que plus  $\lambda$  est fort, moins la politique monétaire optimale ne place de poids sur l'inflation ( $\phi_\pi$  diminue) et plus elle place de poids sur la stabilisation de l'écart de production ( $\phi_x$  augmente). Ce résultat est plutôt intuitif. De plus, une forte réaction à l'inflation, typiquement supérieure à l'unité, n'est pas nécessairement optimale. Ce n'est le cas que lorsque la politique monétaire ne se préoccupe que de l'inflation ( $\lambda = 0$ ) ou que la banque centrale n'est que partiellement transparente (pour les degrés 1 à 3, i.e. si la banque centrale ne communique aucunement ses projections d'inflation et d'écart de production). Au contraire, plus la banque centrale mène une politique transparente, moins la politique monétaire optimale n'est agressive. Il semblerait que la communication,

par son effet sur les anticipations d'inflation, permettre de limiter les effets des chocs de prix à moindre coût en termes d'agressivité de la politique monétaire. Ce résultat peut être mis en parallèle avec les conclusions d'Orphanides & Williams (2005, 2007) : ils montrent que dans un environnement où les agents sont engagés dans un apprentissage perpétuel du modèle de l'économie, la réaction optimale de la banque centrale est moindre lorsque les agents connaissent la cible d'inflation, que lorsque la banque centrale mène une politique opaque.

Néanmoins, même lorsque la banque centrale est très transparente (notamment dans les degrés 4 à 6), cette substitution de la communication à la réaction de politique monétaire n'est pas totale. Cet élément rejoint un constat de Hildebrand (2006) : certes, la transparence et la crédibilité améliorent l'efficacité de la politique monétaire mais ce ne sont pas des substituts à l'action. Nous constatons tout de même que nos résultats relativisent de nouveau la nécessité du principe de Taylor. En outre, lorsque la banque centrale fait preuve de transparence sur l'analyse économique, *i.e.* lorsqu'elle communique aussi ses prévisions macroéconomiques (degrés 4 à 6), elle n'a intérêt à réagir qu'à l'écart de production.

Nous pouvons aussi comparer nos résultats avec l'analyse de la section I.2.2 : il s'agit du cas où la banque centrale ne communique que sur ses objectifs (degré 1) et où  $\lambda$  vaut 1 (qui correspond à la valeur retenue à la section précédente, cf. équation (4.2)) et des résultats obtenus à la section I.2.2 pour la même configuration de chocs ( $\sigma_{mutW} = 0.4$ ) lorsque les agents connaissent la cible (cf. figure 4.7). Dans les deux cas, il est optimal pour la banque centrale de réagir fortement aux deux objectifs. Les résultats sont donc concordants. Cependant, les valeurs minimales correspondantes de la fonction de perte ne sont pas du même ordre de grandeur. Le fait d'avoir considéré l'écart de chômage à la section précédente et l'écart à la production potentielle dans cette section, avec un coefficient d'Okun inférieur à l'unité ne suffit pas à expliquer l'ampleur des différences observées : la perte maximale est un peu supérieure à 0.03 dans le modèle lorsque les agents anticipent l'inflation avec le RNA alors qu'elle est de plus de 0.18 lorsque les agents adoptent le mécanisme de formation des anticipations adaptatif introduit à la section I, soit près de 6 fois plus. Ceci peut s'expliquer par le fait que le mécanisme adaptatif provoque des anticipations myopes, alors que le RNA permet de doter les agents d'un comportement prospectif, découlant de leurs capacités à généraliser. Ainsi, dans le premier cas, les anticipations ne découlent que des performances passées de la banque centrale. En cas de chocs qui éloignent l'inflation de sa cible, les anticipations se trouvent désancrées et nourrissent en retour le processus inflationniste. L'effet des chocs est alors prolongé et la dynamique de l'économie est fortement inertie. Il est d'autant plus difficile d'échapper à une spirale inflationniste ou déflationniste. Par contraste, des anticipations formées grâce au RNA sont plus réactives et il est plus facile pour la banque centrale de stabiliser

l'économie<sup>21</sup>. Néanmoins, même si cette explication semble crédible, cette comparaison nous montre que les résultats du modèle sont très sensibles aux hypothèses comportementales retenues, ce qui pose une limite majeure au travail normatif que nous tentons de mener dans ce chapitre. Il convient de garder cet élément en tête pour discuter les résultats présentés ici.

**Performances macroéconomiques et degrés de transparence** Les figures 4.12 et 4.13a indiquent les performances macroéconomiques en fonction des degrés de transparence de la banque centrale. Rappelons que plus la frontière est verticale, plus le coût d'opportunité en termes de variabilité de l'écart de production d'une stabilisation de l'inflation est élevé. De même, plus elle est plate, plus il est coûteux en termes de variabilité de l'inflation de stabiliser l'écart de production. Enfin, plus la courbe est proche de l'origine, meilleur est l'arbitrage auquel fait face la banque centrale entre stabilisation de l'écart de production et stabilisation de l'inflation. Nous constatons ainsi que le biais d'opacité est très net, avec une perte bien supérieure dans le cas du degré zéro de transparence. Ce biais semble particulièrement affecter la variabilité de l'inflation. Pour limiter la perte encourue, la banque centrale a deux possibilités, dont les résultats sont pratiquement équivalents : soit adopter une politique de transparence portant uniquement sur ses objectifs (degré 1) ou également sur ses décisions (degré 3) couplée à une réaction forte à l'inflation et à l'écart de production ; soit adopter une politique très transparente, portant sur l'analyse économique qui sous-tend ses décisions ainsi que le caractère conditionnel de ses prévisions (degré 6) et réagir de manière modérée aux déviations des objectifs par rapport à leurs cibles. Tout comme lors de l'analyse de la configuration précédente, nous retrouvons la conclusion que la communication semble se substituer partiellement à la réaction de l'instrument de politique monétaire. La figure 4.13a montre ainsi la manière dont la transparence permet de déplacer la frontière efficiente vers l'origine, améliorant ainsi l'arbitrage des autorités monétaires en présence de chocs de prix.

21. Pour appuyer ce raisonnement, il suffit de comparer la dynamique des anticipations moyennes d'inflation dans l'étude précédente, (près de 12% en moyenne, pour un écart-type de plus de 12%, cf. figure I.2.2) à celle relevée dans la configuration 8, avec une cible de 2%, à savoir une moyenne près de 3 fois plus faible, 3,8%, pour un écart-type un peu moindre, 11%.

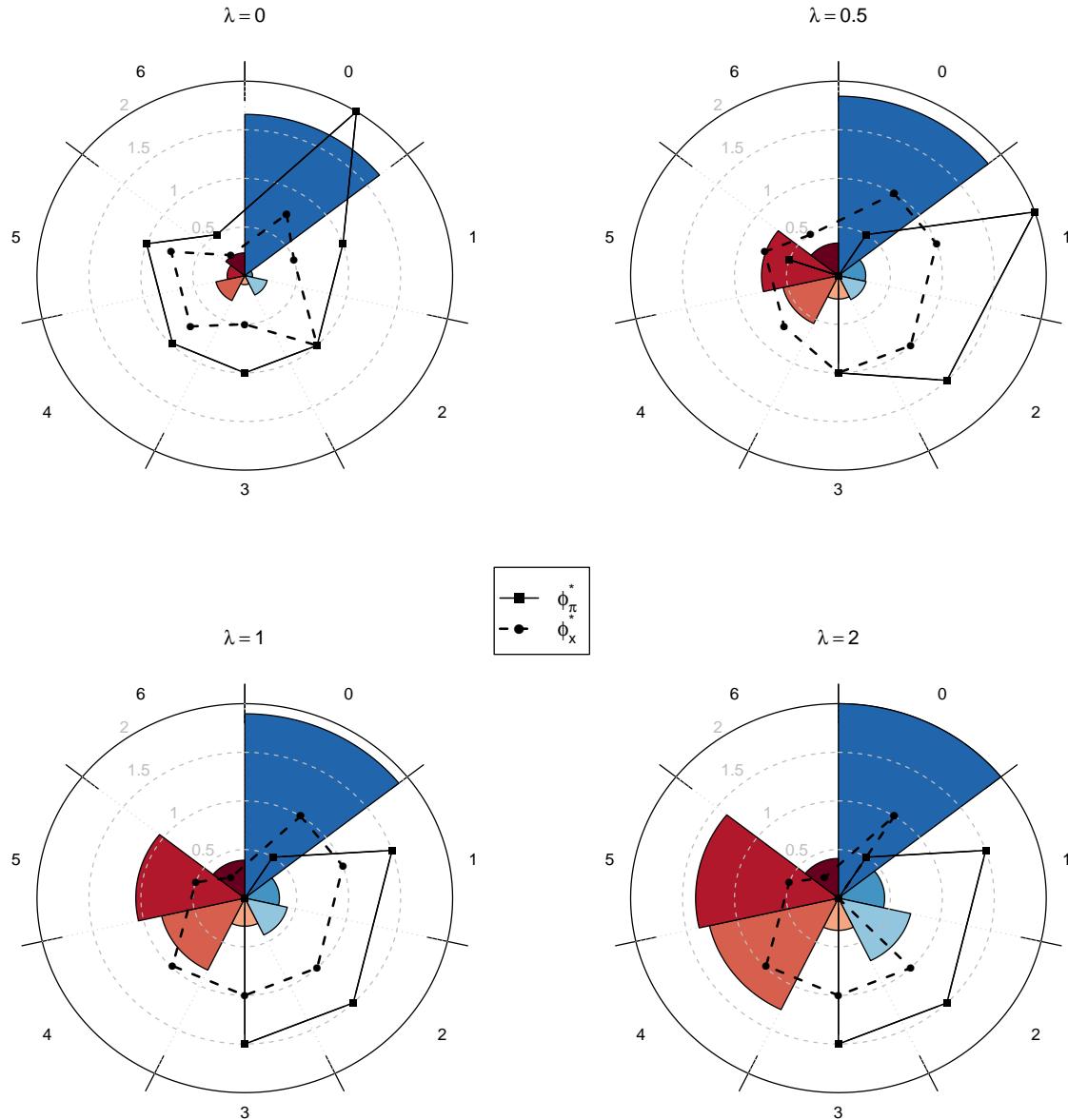


FIGURE 4.12 – Valeur de la fonction de perte et politique monétaire optimale,  $\pi^T = 0.02$  et  $horizon = 4$ .

Ce type de graphique donne deux informations. D'une part, les surfaces colorées représentent les valeurs de la fonction de perte de la banque centrale en fonction de la valeur de  $\lambda$  (cf. équation (4.10)). Ces valeurs sont données relativement à la perte maximale relevée dans l'étude de la configuration 8, qui est normalisée à une unité et correspond à la surface d'un quartier (cette perte maximale s'observe lorsque  $\pi^T = 0.02$ ,  $horizon = 4$  et  $\lambda = 2$  et vaut  $\mathcal{L} = 0.0321$ ). Chaque quartier correspond à une couleur et un degré de transparence (de 0 à 6, cf. tableau 4.3). D'autre part, pour chacun des degrés de transparence et des valeurs de  $\lambda$ , les coefficients optimaux  $\phi_{\pi}$  et  $\phi_x$  qui permettent de minimiser la fonction de perte sont représentés. Les cercles concentriques gris donnent l'échelle de valeurs pour ces coefficients qui va de 0 à l'origine à 2 sur le périmètre du cercle. Par exemple, lorsque  $\lambda = 1$  et que la banque centrale est opaque (degré 0), la perte minimale est proche de la perte maximale observée (donc proche de 0.03) et est obtenue avec  $\phi_{\pi} = 0.5$  et  $\phi_x = 1$ .

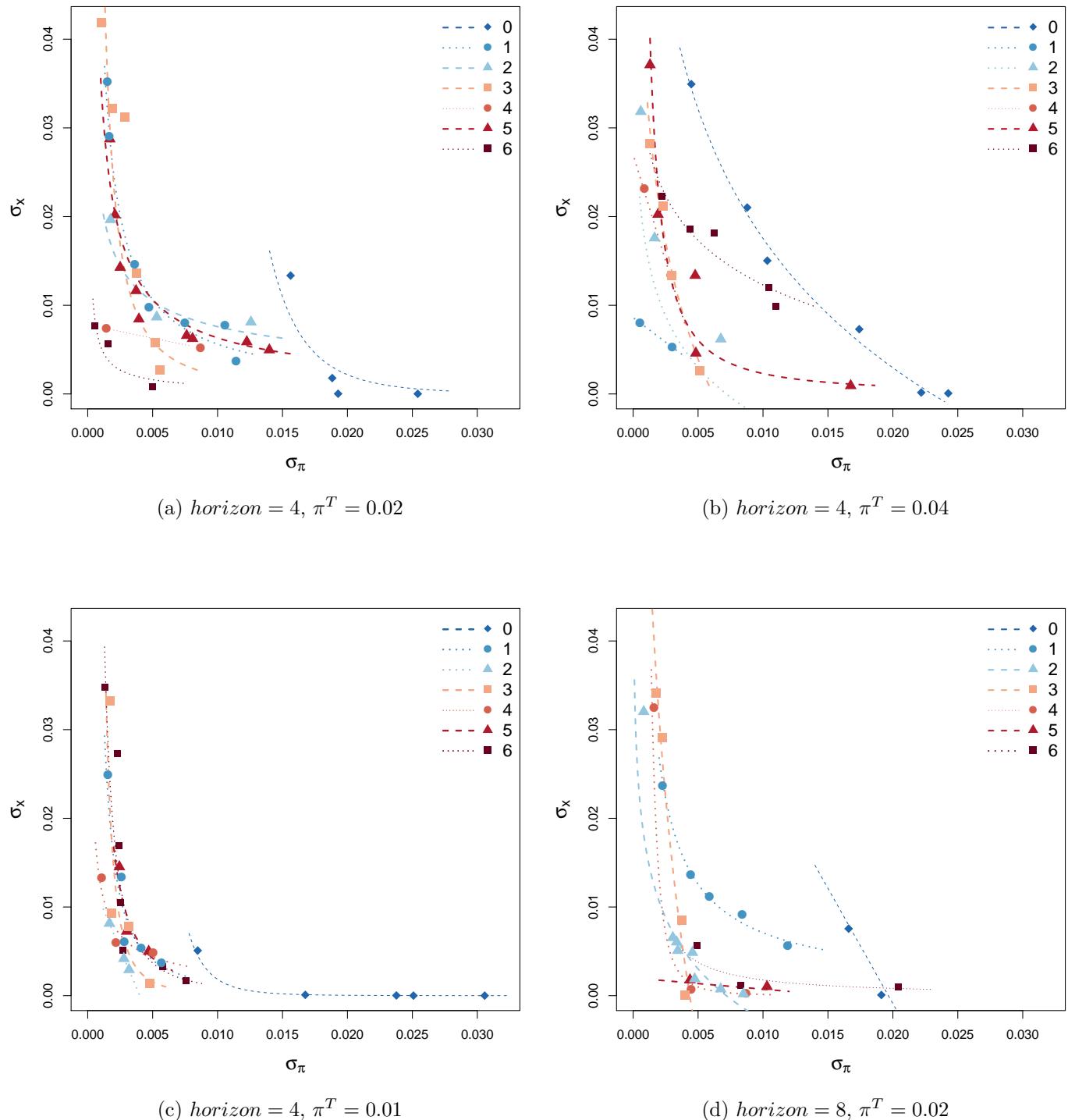


FIGURE 4.13 – Frontières efficientes estimées selon le degré de transparence de la banque centrale (de 0 à 6)

Les frontières, tracées en pointillées résultent d'une estimation par lissage des points et ne sont représentées que pour faciliter la lecture.

Nous obtenons ainsi la proposition suivante :

**Proposition 15** *En présence de chocs assimilables à des chocs de prix, l'une ou l'autre des deux stratégies suivantes limite significativement la perte encourue par la banque centrale :*

- *Etre transparente sur ses objectifs et éventuellement sur ses décisions et réagir fortement à ses deux objectifs.*
- *Etre transparente également sur ses prévisions macroéconomiques mais atténuer une règle de politique monétaire.*

*La seconde stratégie délivre l'arbitrage le plus favorable entre stabilisation de l'inflation et de l'écart de production.*

Pour étayer cette proposition et montrer par quels mécanismes ce résultat est obtenu, la figure 4.14 donne une représentation des relations de corrélation entre le degré de transparence de la banque centrale, les stratégies des ménages et leurs anticipations d'inflation et les performances macroéconomiques en résultant. Ce schéma nous permet d'appréhender la mécanique générale du modèle et de montrer par quels canaux la transparence influence les performances en termes de stabilisation de l'inflation et de l'écart de production.

Comme il a été souligné à la sous-section II.3.1, nous constatons que l'inflation est clairement un phénomène prospectif dans le modèle : le triptyque anticipations d'inflation, comportements d'indexation et dynamique inflationniste est la relation la plus significative dans la chaîne des déterminants des performances dans le modèle. Ces trois variables affichent les corrélations les plus fortes. Nous voyons ensuite que le degré de transparence joue très significativement sur ce canal mais pas du tout sur celui de la consommation. En effet, les coefficients  $\gamma_k$ , que ce soit en moyenne ou par leur variabilité ne jouent que très peu sur les objectifs de la banque centrale et sa politique de transparence ne les influence pas. Il apparaît que le canal de la consommation est pratiquement évincé au profit de celui des anticipations. Ceci peut expliquer que les coefficients optimaux de la règle de politique monétaire soient plutôt faibles lorsque la banque centrale est transparente : l'essentiel de la variabilité macroéconomique résulte du canal des anticipations. Le modèle fait ainsi émerger un comportement tout à fait cohérent avec ce que la théorie macroéconomique récente a mis en lumière : "*Not only do expectations about policy matter, but very little else matters*", écrit par exemple Woodford (2003b, p. 15). Une plus forte homogénéité des anticipations d'inflation est positivement liée à la convergence de l'inflation et de l'écart de production vers les objectifs de la banque centrale mais c'est davantage le niveau moyen des anticipations qui joue. Les variances des stratégies des ménages ont un lien *a priori* contre-intuitif avec les performances macroéconomiques : une plus forte hétérogénéité des comportements est positivement corrélée à une meilleure convergence de l'économie. Cependant, ces corrélations sont faibles

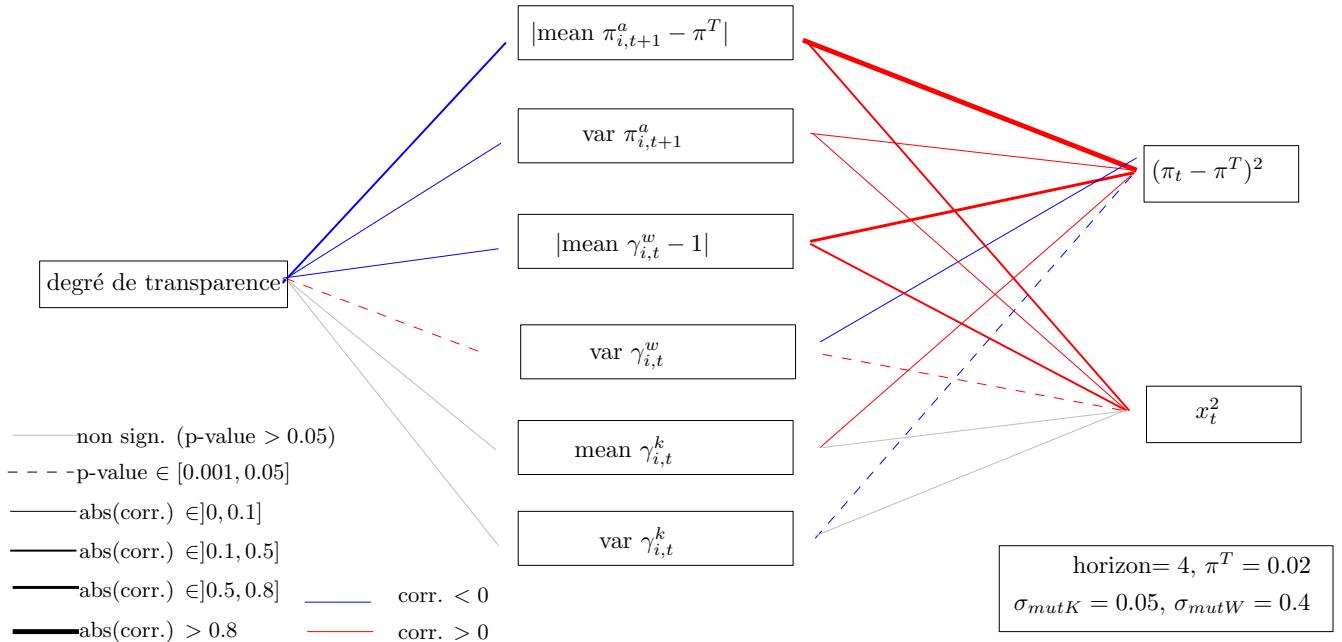


FIGURE 4.14 – Relations de corrélation entre la politique de transparence de la banque centrale, les stratégies et anticipations des ménages et les performances macroéconomiques dans le modèle.

NB :  $t = \{100, 125, 150, 175, 200, \dots, 800\}$  et  $i \in \{1, \dots, 500\}$ .

et pas toujours significatives. Nous remarquons enfin que le canal des anticipations est lié de la même manière à l'écart de production qu'à l'écart d'inflation : un désancrage des anticipations est associé à un écart de production supérieur. Notons qu'il ne s'agit que de corrélations et nous ne pouvons interpréter ces chiffres en donnant le sens particulier de la relation.

Nous détaillons maintenant les liens entre stratégies des ménages, anticipations d'inflation et performances macroéconomiques selon les 7 degrés de transparence. Le tableau 4.7 donne les corrélations qui sont significativement affectées par le niveau de transparence de la banque centrale et le tableau 4.8 des statistiques descriptives résumant la dynamique des anticipations et des comportements dans le modèle. Nous voyons ainsi la manière dont la transparence de la banque centrale affecte le canal des anticipations. La corrélation entre l'écart d'inflation et l'écart des anticipations à la cible nous indique la corrélation entre l'inflation effective et l'inflation anticipée. Plus celle-ci est faible, mieux les anticipations sont ancrées. En effet, un changement temporaire sur la dynamique inflationniste se répercute d'autant plus dans les anticipations que les deux sont corrélées. Sur ce point, l'annonce de la cible (scenario 1) ainsi que des projections du taux d'intérêt (scenario 3) permettent de baisser conjointement et significativement le niveau moyen et la variabilité des anticipations d'inflation et de l'inflation effective. Nous voyons surtout que les corrélations entre les performances macroéconomiques (en particulier l'écart d'inflation), les anticipations moyennes d'inflation et les comportements d'in-

	Degrés de transparence						
	0	1	2	3	4	5	6
$ \text{mean}(\pi^a) - \pi^T  / (\pi - \pi^T)^2$	0.935 (<2.2e-16)	0.659 (<2.2e-16)	0.698 (<2.2e-16)	0.701 (<2.2e-16)	0.908 (<2.2e-16)	0.932 (<2.2e-16)	0.942 (<2.2e-16)
$ \text{mean}(\pi^a) - \pi^T  / x^2$	0.403 (<2.2e-16)	0.153 (<2.2e-16)	0.129 (<2.2e-16)	0.094 (<2.2e-16)	0.113 (<2.2e-16)	0.22 (<2.2e-16)	0.27 (<2.2e-16)
$\text{var}(\pi^a) / (\pi - \pi^T)^2$	0.022 (0.004)	0.131 (<2.2e-16)	0.238 (<2.2e-16)	0.217 (<2.2e-16)	0.126 (<2.2e-16)	0.143 (<2.2e-16)	0.073 (<2.2e-16)
$ \text{mean}(\gamma_w)  / (\pi - \pi^T)^2$	0.873 (<2.2e-16)	0.29 (<2.2e-16)	0.37 (<2.2e-16)	0.362 (<2.2e-16)	0.468 (<2.2e-16)	0.66 (<2.2e-16)	0.623 (<2.2e-16)

Tableau 4.7 – Tests de corrélation de Pearson (14500 observations par degré de transparence, *p-value* entre parenthèses)

	Degrés de transparence						
	0	1	2	3	4	5	6
$(\pi - \pi^T)^2$	0.062 (0.111)	0.008 (0.043)	0.01 (0.05)	0.008 (0.041)	0.007 (0.034)	0.017 (0.057)	0.01 (0.052)
$x^2$	0.04 (0.122)	0.033 (0.118)	0.043 (0.149)	0.038 (0.137)	0.05 (0.151)	0.033 (0.124)	0.017 (0.103)

Tableau 4.8 – Moyenne et écart-types entre parenthèses (14500 observations par degré de transparence).

dexation baissent significativement lorsque la banque centrale est transparente sur ses objectifs. Cette baisse se répercute très fortement aussi bien sur le niveau que l'écart d'inflation, mais beaucoup moins sur l'écart de production.

En revanche, lorsque la banque centrale adopte une politique très transparente (notamment avec le degré 6), ces corrélations se renforcent, suggérant que les anticipations sont plus sensibles à la dynamique inflationniste effective. Cependant, les anticipations sont plus proches de la cible et moins volatiles et les comportements d'indexation sont plus faibles et eux aussi plus stables. Ceci permet de stabiliser l'inflation de manière satisfaisante. De plus, l'écart de production est lui aussi mieux stabilisé que sous les autres degrés de transparence. Ceci s'explique par le fait qu'il est lui aussi davantage corrélé au niveau des anticipations, qui sont plus proches de la cible.

En conséquence, les deux configurations mises en lumière à la proposition 15 délivrent des valeurs de la fonction de perte du même ordre de grandeur mais ce sont des mécanismes différents qui sont à l'oeuvre. Lorsque la banque centrale ne communique que ses objectifs (degré 1), la réaction optimale est une règle agressive, qui permet de maintenir les anticipations d'inflation à un niveau faible et de mieux isoler la dynamique inflationniste à la fois des variations dans les anticipations d'inflation et dans les comportements d'indexation. En retour, l'écart d'inflation est plus faible et moins volatile que lorsque la banque centrale mène une politique opaque. Lorsque les autorités monétaires mènent

au contraire une politique très transparente (degré 6), la dynamique inflationniste, le comportement d'indexation et les anticipations d'inflation sont plus fortement corrélés mais les anticipations sont plus proches de la cible et les comportements d'indexation plus faibles. En retour, l'inflation est stabilisée de manière satisfaisante, au prix d'une réactivité moindre de la règle de la politique monétaire : l'essentiel de l'action passe par l'effet des informations transmises par la banque centrale sur les anticipations d'inflation. Cependant, ce canal est moins efficace à stabiliser l'inflation que celui à l'oeuvre sous la transparence uniquement des objectifs. Néamoins, avec une transparence très forte, l'écart de production est davantage corrélé à l'ancrage des anticipations et ainsi mieux stabilisé que dans le degré 1.

En conclusion, annoncer uniquement les objectifs stabilise mieux l'économie qu'une politique opaque grâce à une réaction plus forte du taux d'intérêt qui permet d'isoler davantage le modèle des variations dans les anticipations et les comportements des agents ; mener une politique très transparente stabilise mieux l'économie qu'une politique opaque en liant fortement les objectifs de la politique monétaire aux comportements et aux anticipations, qui sont tous deux plus favorables à la stabilité macroéconomique. Ce dernier point est cohérent avec l'analyse de Jensen (2002) qui montre que lorsque la banque centrale est très transparente, la réactivité des anticipations des agents aux bruits et aux actions de la banque centrale augmente (voir aussi Faust & Svensson (2001) sur ce point).

**Horizon des prévisions, niveau de la cible et performances macroéconomiques** Les figures 4.15, 4.13c, 4.13b et 4.13d donnent la sensibilité de ces résultats lorsque la cible est portée à 1 ou 4% et l'horizon des prévisions relevé à 8 périodes.  $\lambda$  est fixé à 1, puisque les résultats ne sont pas qualitativement modifiés pour d'autres valeurs de  $\lambda$ . Tout d'abord, augmenter la cible d'inflation détériore globalement la situation alors que diminuer la cible produit des effets mitigés. Ceci réduit l'apport relatif de la communication en limitant le biais d'opacité et en harmonisant les performances parmi les différents degrés de transparence. En revanche, la banque centrale délivre toujours la perte minimale avec une cible à 2%. Cette constatation avait été faite à la section précédente face à ce type de chocs (cf. tableau 4.2 et figures 4.7 et D.11). L'examen des frontières efficientes confirme ce point. Avec une cible plus élevée, le bénéfice d'une transparence totale (degré 6) disparaît et l'arbitrage est plus favorable si la banque centrale ne communique que sur ses objectifs (degré 1). Avec une cible plus faible, le gain relatif à la transparence diminue puisque les frontières sont très semblables dès que le degré de transparence est strictement supérieur à 0. De plus, les courbes sont plus verticales, signalant qu'il est plus coûteux en termes de stabilisation de l'écart de production de stabiliser l'inflation. Ceci paraît intuitif dans la mesure où une cible d'inflation plus faible est un objectif plus exigeant pour

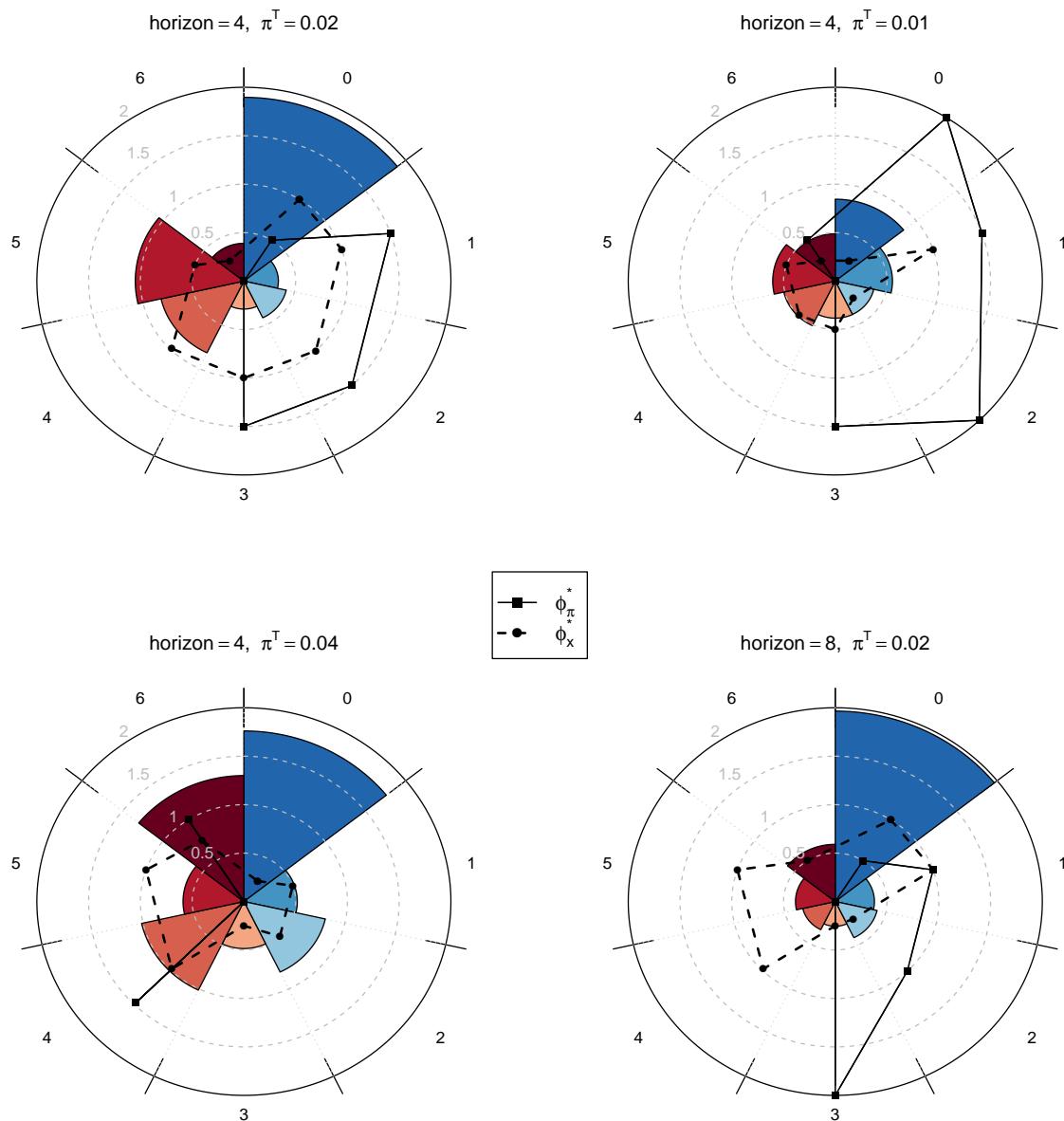


FIGURE 4.15 – Sensibilité des résultats à la valeur de la cible et de l’horizon des prévisions de la banque centrale

la banque centrale et le remplir s’obtient au prix d’une plus forte volatilité de l’écart de production. Ainsi, à l’exception du degré 0 dans lequel le biais d’opacité est très marqué, les différences entre les performances délivrées par différents degrés de transparence sont plus marquées à mesure que la cible d’inflation augmente.

Augmenter l’horizon des prévisions de la banque centrale permet en revanche d’améliorer la stabilisation macroéconomique dans le cas où la transparence porte sur l’analyse économique (degrés 4

et 5). Un horizon plus long élimine l'intérêt d'annoncer également le caractère conditionnel des prévisions (degré 6). Notons que les performances sont identiques pour ce qui est des degrés 0 et 1 puisque cette variable n'intervient pas dans ces cas-là. Les différences qui subsistent sont dues au caractère non déterministe des simulations. De plus, la politique optimale ne semble pas fondamentalement affectée par l'horizon des prévisions. En analysant la figure 4.13d, l'horizon des prévisions ne semble jouer clairement que sur les degrés 4 à 6, lorsque la banque centrale communique ses prévisions de taux d'inflation et d'écart de production. Dans ce cas, les courbes se trouvent aplatis, à des niveaux faibles de variabilité de l'écart de production : stabiliser l'inflation devient peu coûteux en termes d'écart de production.

La théorie économique n'a pas de résultat consensuel sur les bienfaits de davantage de transparence économique sur les performances de la politique monétaire (cf. sous-section II, chapitre 1). Néanmoins, la littérature sur l'apprentissage a contribué à ce débat. Cette voie de recherche montre en général qu'une forte transparence fournit des informations utiles aux agents et leur permet d'apprendre plus vite de leur environnement. Ceci permet de limiter la volatilité macroéconomique (voir la sous-section IV au chapitre 1). Les études empiriques montrent également comment une communication accrue de la part de la banque centrale, incluant notamment les projections de taux d'intérêt, de taux d'inflation et de niveaux de production futurs, contribue à stabiliser de manière plus performante la dynamique économique, cet effet passant par le canal des anticipations (par exemple Minegishi & Cournède (2009)). Le cadre à base d'agents que nous avons mobilisé tout au long de ce travail permet ainsi de renforcer ces conclusions.

## Conclusion

Ce chapitre s'est fondé sur une analyse en partie normative de la politique monétaire dans notre modèle à base d'agents. Pour ce faire, nous avons endogénéisé le mécanisme de formation des anticipations des agents et insisté sur la manière dont les autorités monétaires peuvent l'influencer. Cette modélisation est tout à fait en phase avec le paradigme actuel qui considère les banques centrales comme des "managers" d'anticipations. C'est en effet essentiellement par ce canal que la politique monétaire parvient à influencer la stabilisation conjoncturelle de l'économie. Deux mécanismes de formation des anticipations sont intégrés au modèle minimal et confrontés. Le premier est adaptatif, résultant en une dynamique des anticipations fortement inertielle, dans laquelle la communication de la banque centrale se résume à l'annonce ou non d'une cible et d'un rayon de tolérance associé. Le second fournit une représentation plus fine des anticipations des agents, permettant de les doter d'une capacité à généraliser et d'un comportement prospectif. Il permet ainsi une modélisation compatible avec le caractère *forward-looking* de la conduite de la politique monétaire.

Nos résultats s'articulent autour de deux argumentaires, qui nous ont permis de faire le lien entre notre étude et les résultats établis dans la littérature macroéconomique récente. D'une part, nous avons pu dégager des résultats concernant les règles de politique monétaire optimale en présence d'incertitude. Dans notre modèle, l'incertitude résulte d'une interdépendance complexe entre la dynamique d'apprentissage des agents et les décisions de politique monétaire : le comportement des agents, guidé par une rationalité procédurale dans un environnement d'incertitude radicale, détermine les canaux de transmission de la politique monétaire à l'économie (à la fois par la consommation et les anticipations). En conséquence, la banque centrale ne connaît pas la forme du modèle sous-jacent de l'économie et ne peut déterminer la politique monétaire optimale compte tenu de ce modèle. A cet égard, nous montrons qu'une politique monétaire agressive est en général de mise face à une telle incertitude, rejoignant ainsi les conclusions de la littérature sur la robustesse des règles de politique monétaire. D'autre part, nous avons pu contribuer au débat sur la transparence optimale à adopter face à cette incertitude. Sur ce point, nos conclusions donnent un avantage à une politique très transparente, à la fois sur les objectifs, les décisions et l'analyse macroéconomique qui les sous-tend, notamment dans un contexte marqué par des chocs de prix de forte ampleur. Une forte transparence permet d'ailleurs de stabiliser l'économie avec une règle moins agressive et d'améliorer l'arbitrage entre la stabilisation des deux objectifs.

Néanmoins, comme nous l'avons fait remarquer plus haut, les résultats sont, au moins partiellement, sensibles aux mécanismes de formation des anticipations retenus. Il convient alors de rester prudent quant aux résultats exposés dans ce chapitre et de ne pas nécessairement en généraliser les

conclusions. L'intérêt réside surtout dans la démonstration de la validité de l'approche à base d'agents et d'algorithmes tels que les RNA pour modéliser et analyser les interactions entre politique monétaire dans un contexte d'incertitude, anticipations des agents dotés de rationalité limitée et performances macroéconomiques.



# Conclusion générale

Cette thèse a proposé une méthode de construction, de validation et d'exploitation d'un modèle à base d'agents conçu pour l'analyse de politiques monétaires et des régimes de ciblage de l'inflation en particulier. Le modèle obtenu produit une économie artificielle dans laquelle des agents dotés de rationalité limitée et hétérogènes interagissent, pour donner lieu à l'émergence de la dynamique économique. Nous nous sommes ainsi affranchis des hypothèses les plus fortes nécessaires à la dérivation des modèles Nouveaux Keynésiens, à savoir l'hypothèse d'anticipations rationnelles et d'agent représentatif. Dans ce laboratoire, nous avons évalué comment les processus d'apprentissage affectent les propriétés des dynamiques macroéconomiques et la stabilisation de l'économie par la banque centrale. Nous avons revisité les résultats établis par la littérature macroéconomique standard, pour en améliorer la robustesse. Ainsi, nos résultats réaffirment l'influence prépondérante du canal des anticipations dans la réussite de la politique monétaire. Ils soulignent le rôle primordial de la crédibilité des annonces de la banque centrale et du bon ancrage des anticipations d'inflation sur l'objectif des autorités monétaires pour la stabilisation macroéconomique.

La théorie économique n'a pas de résultat consensuel sur les bienfaits de davantage de transparence de la banque centrale. Sur ce point, nous contribuons au débat sur le degré de transparence optimale initié par Morris & Shin (2002). Nos résultats sont toutefois sensibles à la spécification du processus de formation des anticipations envisagée. Alors que l'annonce d'une cible d'inflation permet d'améliorer significativement la stabilisation de l'inflation, dès que les agents adoptent des anticipations prospectives, ce résultat n'est pas valable en considérant une spécification myope et mécanique des anticipations. Nous concluons par ailleurs en faveur d'une transparence forte, incluant notamment la publication des projections de taux d'intérêt et des prévisions macroéconomiques. De plus, certains résultats de la littérature se trouvent infirmés par notre travail. C'est le cas de la nécessité du principe de Taylor, qui prescrit une réaction de l'instrument de politique monétaire plus que proportionnelle aux déviations de l'inflation à sa cible. Là encore, nos conclusions dépendent du mécanisme d'anticipations retenu. Une politique de transparence accrue, qui joue en retour sur des anticipations prospectives, permet de stabiliser l'économie au prix d'une agressivité moindre de la règle mais si on retient un mécanisme purement adaptatif des anticipations, nous concluons à l'optimalité de règles agressives, dans le sillon des conclusions de la littérature étudiant la robustesse des règles en milieu incertain, initié par les travaux de Brainard (1967). Notre analyse dégage aussi de nouveaux résultats et contribue par là à étendre la littérature existante, notamment sur l'impact de l'apprentissage sur la transmission de la politique monétaire. Une conclusion forte qui en ressort est la nécessité de la prise

en compte de ces dimensions dans la modélisation et l'analyse normative de la politique monétaire.

Ce cadre d'analyse pourrait être par ailleurs facilement mobilisé pour intégrer les *mesures* dites *non-conventionnelles*, mesures auxquelles ont largement recours les banques centrales depuis le déclenchement de la crise. Elles ont servi à enrayer la spirale déflationniste qui menaçait de se déclencher après que les taux directeurs des principales banques centrales ont été abaissés au plancher zéro. Cet aspect pourrait compléter judicieusement la modélisation, d'autant plus que le problème du plancher zéro a été soulevé au cours de l'analyse de notre modèle (notamment au chapitre 3). Nous avons aussi abordé la question du changement de la cible d'inflation, en écho aux débats ouverts par la crise sur la réforme de la conduite de la politique monétaire. Nos résultats sont mitigés et sont là aussi sensibles aux types de chocs et de mécanismes d'anticipations retenus. Cependant, le bénéfice potentiel d'un relèvement de la cible n'apparaît pas de manière tranchée. Toujours près des débats actuels, nous pourrions également tester les conséquences de l'adoption du ciblage du niveau général des prix. Les réticences à son adoption concernent le risque de perte de clarté de l'objectif poursuivi et ainsi de perte de crédibilité des autorités monétaires ou le risque d'augmentation de la volatilité de l'inflation. Il serait possible de tester dans notre cadre d'analyse à base d'agents dans quelle mesure et à quelles conditions nous pourrions valider ces craintes. Cependant, notre modèle comporte une limite majeure, qui nous amène à accueillir les résultats normatifs avec précaution : l'absence de validation empirique. Une extension du travail de thèse rapide peut être d'abord envisagée dans ce sens.

Plus fondamentalement, notre modèle n'est qu'un modèle réduit de l'environnement dans lequel agit une banque centrale et ne permet pas d'en intégrer l'ensemble des fonctions. En effet, les autorités monétaires doivent d'abord fournir un ancrage nominal à la monnaie en maîtrisant la volatilité de l'inflation, à moindre coût en termes de volatilité de la production. Ceci passe par une gestion efficace des anticipations d'inflation. Notre modèle contribue à compléter la littérature et à renforcer la robustesse de ses résultats sur ce point. Or, les banques centrales se doivent aussi de promouvoir un système de paiement efficace et sûr, afin d'éviter l'effondrement des systèmes financiers et une pénurie soudaine des moyens de paiement. La crise financière actuelle peut poser la question de savoir si elles ont suffisamment accordé d'importance à cette mission. Le rapport de Betbèze et al. (2011) contient un exposé complet et critique des débats soulevés par la crise sur l'avenir de la politique des banques centrales. Il apparaît que deux canaux ont sans doute été négligés et ont mené, au moins pour partie, à l'instabilité financière. Le premier relève de la *prise de risque* des agents économiques, en premier lieu des banques : la stabilité monétaire, renforcée par la forte crédibilité des banques centrales, aurait contribué à réduire l'aversion au risque des investisseurs et les aurait poussés à prendre des risques excessifs (voir Minsky (1977) pour une contribution initiale sur ce point, Borio & Lowe (2002) plus

récemment). On parle du paradoxe de la crédibilité. Les effets correspondants transitent ensuite par le *canal du crédit*.

A cet égard, notre travail n'apporte pas de modélisation convaincante car nous avons – volontairement – fait abstraction de la modélisation de la sphère financière et la représentation du système bancaire est très grossière. Les modèles analytiques font également très souvent abstraction de l’intermédiation financière car ils reposent sur l’hypothèse de marchés efficents (Fama (1970)) et d’arbitrage optimal. Ces modèles concluent ainsi que la banque centrale n’a pas à réagir aux mouvements de prix des actifs dès que ceux-ci n’affectent pas ses anticipations d’inflation (Bernanke & Gertler (2001)) : la stabilité monétaire implique la stabilité financière. La crise de 2007 a démontré que ceci n’allait pas de soi. Sur ce point aussi, les contours théoriques doivent être redessinés pour unifier dans un seul cadre d’analyse les différentes missions des banques centrales. Nos modèles doivent inclure des dimensions de la *politique macroprudentielle*, c'est-à-dire la politique de stabilité financière globale. Elle apparaît effectivement aujourd’hui comme un enjeu central des banques centrales, que cette politique macroprudentielle soit coordonnée avec la politique monétaire au sein des banques centrales ou confiée à des organismes de supervision spécialisés en étroite collaboration avec ces dernières. Cette politique macroprudentielle implique d’autres instruments que la règle de taux d’intérêt et la politique de transparence des banques centrales. Les deux principaux sont les ratios de fonds propres et les ratios de liquidités. Il pourra être utile de prendre en compte l’incidence de ces éléments sur le crédit bancaire et les mécanismes de transmission de la politique de taux à l’économie ainsi que l’évolution des conditions financières. La nécessaire évolution de la politique macroprudentielle suite à la crise financière de 2007 est surtout guidée par le pragmatisme des régulateurs et des superviseurs, étant donné que les modèles standards font largement abstraction de ces aspects. Se posent alors plusieurs questions quant à l’incidence de cette politique parmi lesquelles : assigner à la banque centrale un objectif de stabilité financière, par exemple en intégrant une mesure de l’évolution du prix des actifs ou du crédit bancaire dans la règle diluerait-il sa mission de stabilisation des prix et contribuerait-il par là à désancker les anticipations d’inflation ? Un relèvement de l’obligation de ratios de fonds propres conduirait-il nécessairement à augmenter le coût du crédit bancaire (*i.e.* à une hausse des taux de prêt) ? Goodhart (2011) donne un survol de ces questions.

Intégrer ces différentes dimensions dans un seul cadre d’analyse serait susceptible d’apporter quelques éléments de réponse à ces questions. Il serait intéressant d’étoffer notre modèle en considérant plusieurs firmes et un système de crédit bancaire à celles-ci et aux ménages, quitte à simplifier le comportement des ménages, pour mettre l’accent sur l’interaction des politiques de taux et de gestion du risque de crédit. Des éléments convaincants peuvent être empruntés aux travaux issus du

projet EURACE (Deissenberg et al. (2008)), ou à ceux de Haber (2008) et Delli Gatti et al. (2010), qui fournissent une modélisation assez complète du marché du crédit dans un cadre à base d'agents. Le modèle EURACE retient notamment plusieurs rôles de la banque centrale : la fixation du taux d'intérêt directeur, le contrôle du niveau de risque de crédit des banques commerciales par le biais du ratio de fonds propres obligatoire, l'achat de bons du Trésor émis par l'État et le rôle de prêteur en dernier ressort lorsque les banques font face à un manque de liquidités. Cependant, la mission de management des anticipations, centrale dans notre travail, est totalement absente de ce modèle. Il y a là un gisement potentiel d'amélioration de notre cadre d'analyse.

Enfin, sur le plan méthodologique, nous avons proposé d'analyser notre modèle par une technique d'estimation d'un métamodèle. Di Guilmi et al. (2012) développent une méthode d'obtention de solutions analytiques dans un modèle à base d'agents fondée sur les équations différentielles ordinaires. Cette voie pourrait être prometteuse pour générer des résultats les plus généraux possibles.

ANNEXE A

**Annexes au chapitre 1**

---



## I Le ciblage de l'inflation comme parade au biais inflationniste : modélisation

En suivant Svensson (1997*b*) et Walsh (2003*b*, chap. 8), nous développons ci-dessous une modélisation du problème du biais inflationniste. Nous montrons ensuite dans ce cadre la façon dont l'annonce de la cible, ainsi que la transparence sur les prévisions des chocs de la banque centrale permettent d'y remédier.

### I.1 Le problème du biais inflationniste

Pour prévoir l'impact d'une décision de la banque centrale sur l'économie, il faut comprendre comment les anticipations des agents réagissent à cette décision. Si la banque centrale agit suivant une règle systématique et que les agents ont une parfaite connaissance de ses objectifs et du modèle de fonctionnement de l'économie, ils peuvent utiliser cette règle pour en inférer rationnellement les effets de la politique annoncée. Ils peuvent ensuite intégrer cette information dans leurs prises de décision, par exemple négocier leurs salaires nominaux et fixer leurs prix sur la base de la politique monétaire future anticipée. Mais une fois que leurs décisions économiques sont fixées, la banque centrale peut avoir intérêt à dévier de la règle initialement prévue selon les objectifs auxquels répond son action. Sa politique est alors frappée par l'incohérence temporelle : une action prévue (et annoncée) en  $t$  pour un temps  $t + n$  peut ne plus être optimale en  $t + n$  si la nature des contraintes et des incitations auxquelles fait face la banque centrale s'est modifiée. La règle n'apparaît crédible dans ces conditions que si un mécanisme d'engagement préalable encadre l'action de la banque centrale. Dans le cas contraire, les agents comprendront les incitations de la banque centrale et les intégreront dans leurs anticipations. C'est le cas d'une politique de poursuite de faible inflation. Si les agents fixent leurs anticipations sur la base de cet objectif, la banque centrale peut avoir une incitation à délivrer un taux d'inflation plus élevé. En effet, une fois les anticipations d'inflation des agents fixées et les salaires nominaux négociés, si l'inflation réelle excède l'inflation anticipée, les salaires réels seront moindres et les entreprises augmenteront l'emploi. L'inflation surprise joue ainsi positivement sur le produit. En l'absence d'engagement sur l'objectif, les agents privés comprennent cette incitation et anticipent effectivement un taux d'inflation plus élevé.

Cette problématique a été abordée dans la littérature en considérant que la banque centrale agit sous deux régimes de politique monétaire, l'un associé à un mécanisme d'engagement sur une règle, l'autre qualifié de discrétionnaire où elle peut réviser sa politique à chaque période.

Supposons dans ce cadre et quel que soit le régime en place que la banque centrale désire minimiser la valeur espérée d'une fonction de perte quadratique  $V$  :

$$V = \frac{1}{2}(y - y^n - k)^2 + \frac{1}{2}\pi^2 \quad (\text{A.1})$$

avec  $\pi$  le taux d'inflation,  $y$  le produit,  $y^n$  le produit naturel et  $k > 0$ .  $V$  pénalise les fluctuations de l'inflation et du produit autour respectivement de la cible d'inflation supposée nulle et de  $y^n + k > y^n$ . Plusieurs raisons peuvent pousser la banque centrale à stabiliser le produit au-delà de son niveau d'équilibre : d'une part, la présence de distorsions telles des taxes sur le marché du travail ou des entraves à la concurrence parfaite sur le marché des biens peuvent rendre le produit d'équilibre plus faible que le produit optimal ; d'autre part, des pressions politiques des gouvernements tentent de pousser l'économie au-delà de son niveau d'équilibre pour créer des phases d'expansion qui créent des conditions plus favorables à leur réélection. L'économie est décrite par une courbe d'offre à la Lucas :

$$y = y^n + a(\pi - \pi^e) + e \quad (\text{A.2})$$

avec  $a > 0$  et  $e$  un choc de moyenne nulle et de variance  $\sigma_e^2$ . La banque centrale met en œuvre le

taux d'inflation qui minimise (A.1). Les agents sont supposés connaître ce problème et former une anticipation rationnelle au sens de Muth (1961) du taux d'inflation futur  $\pi^e$  qu'ils utilisent ensuite dans leurs négociations salariales ou leurs décisions de fixation de prix.

**Engagement sur une règle optimale** Si on considère que la banque centrale est capable de s'engager sur une règle, étant donné la structure linéaire quadratique du modèle, la règle optimale est de forme linéaire :

$$\pi^c = b_0 + b_1 e \quad (\text{A.3})$$

La banque centrale s'engage sur des valeurs précises de  $b_0$  et  $b_1$  avant que les agents n'aient formé leurs anticipations d'inflation et avant d'avoir observé le choc  $e$ . Les agents utilisent alors la règle (A.3) pour former leurs anticipations d'inflation et on a :  $\pi^e = E(\pi^c) = b_0$ . En intégrant  $\pi^e$  dans la fonction de perte (A.1), on a :

$$V^c = \frac{1}{2}(ab_1e + e - k)^2 + \frac{1}{2}(b_0 + b_1e)^2 \quad (\text{A.4})$$

La banque centrale, s'engageant sur la règle avant d'avoir observé  $e$ , minimise l'espérance de  $V^c$ . On a donc la condition du premier ordre suivante :

$$\pi^c = -\frac{a}{1+a^2}e \quad (\text{A.5})$$

soit l'inflation moyenne  $b_0 = 0$ , la réponse stabilisatrice au choc  $e$   $b_1 = -\frac{a}{1+a^2}$  et la perte espérée  $E(V^c) = \frac{1}{2}k^2 + \frac{1}{2}\frac{\sigma_e^2}{1+a^2}$ . L'engagement sur une règle permet d'assurer une inflation anticipée par les agents et effective nulle en moyenne. Mais, comme le montre la fonction (A.2), la banque centrale a intérêt à délivrer un taux d'inflation supérieur à zéro une fois qu'elle a observé le choc  $e$  et que les agents ont fixé les anticipations d'inflation à zéro. Elle créerait ainsi de l'inflation surprise qui pousse le produit au-delà de  $y^n$ . La promesse de délivrer une inflation faible n'est pas crédible.

**Politique discrétionnaire** Si la banque centrale ne peut s'engager sur une règle, la séquence des événements est la suivante : d'abord les agents déterminent leurs anticipations d'inflation  $\pi^e$  puis la banque centrale observe  $\pi^e$  et le choc d'offre  $e$  et fixe le taux d'inflation  $\pi$ . En remplaçant (A.2) dans (A.1) et en prenant  $\pi^e$  comme donnée, on obtient la condition du premier ordre conditionnelle à la réalisation de  $e$  suivante :

$$\pi = \frac{1}{1+a^2}(a^2\pi^e + a(k - e)) \quad (\text{A.6})$$

Les agents ayant parfaite connaissance du programme de la banque centrale, ils anticipent l'inflation en utilisant (A.6), soit :

$$\pi^e = E(\pi) = \frac{a^2\pi^e + ak}{1+a^2} \Rightarrow \pi^e = ak \quad (\text{A.7})$$

En substituant (A.7) dans (A.6), on obtient l'inflation effective en discrétion  $\pi^d$  :

$$\pi^d = ak - \frac{a}{1+a^2}e \quad (\text{A.8})$$

et la perte moyenne associée à la politique discrétionnaire :

$$V^d = \frac{1}{2}(1+a^2)k^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{1+a^2}\right)\sigma_e^2 \quad (\text{A.9})$$

On constate que la politique discrétionnaire délivre un taux d'inflation moyen positif  $ak > 0$  par rapport au taux d'inflation moyen nul dans le cas d'un engagement sur une règle : il s'agit du *biais inflationniste*. On remarque en revanche que la réaction au choc est identique. La politique

discrétionnaire est sous-optimale du point de vue du *niveau* de l'inflation. Le biais est croissant en  $a$ , l'effet de l'inflation surprise sur le produit et en  $k$ , l'écart entre la cible de produit de la banque centrale et le produit d'équilibre. La perte espérée est également plus élevée en discréption :  $V^d > V^c$ .

## I.2 L'annonce de la cible comme parade au biais inflationniste : modélisation

L'objectif est de trouver des solutions qui amènent la banque centrale à l'équilibre sous engagement sous un régime discrétionnaire. Ceci constitue un *second-best* par rapport au *first-best* qui serait de supprimer les distorsions qui rendent la discréption sous-optimale. En suivant les travaux de Svensson (1997b), Walsh (1995, 2003b), une de ces solutions consiste à assigner à la banque centrale une *cible* d'inflation et à la pénaliser pour les déviations de l'inflation vis-à-vis de cette cible dans un contrat type principal-agent. Le ciblage de l'inflation est aussi modélisé comme un cadre de *discréption contrainte*.

La cible d'inflation  $\pi^T$  est imposée par le principal (elle peut différer de la cible optimale  $\pi^*$ ). La cible est interprétée comme une sanction dans la fonction de perte de la banque centrale (A.1), ce qui la modifie comme suit :

$$V = \frac{1}{2}(y - y^n - k)^2 + \frac{1}{2}\pi^2 + \frac{1}{2}h(\pi - \pi^T)^2 \quad (\text{A.10})$$

avec  $h > 0$  l'importance accordée aux déviations de l'inflation par rapport à la cible. En substituant (A.2) dans (A.10) et en prenant  $\pi^e$  comme donnée, la condition du premier ordre donne l'inflation qu'il est optimal pour la banque centrale de délivrer :

$$\pi = \frac{1}{1 + a^2 + h}(a^2\pi^e + a(k - e) + h\pi^T) \quad (\text{A.11})$$

Les agents formant leurs anticipations en utilisant (A.11) avant d'observer  $e$ , on a :  $\pi^e = \frac{ak + h\pi^T}{1+h}$ . En intégrant  $\pi^e$  dans (A.11), on a le taux d'inflation effectivement délivré par la banque centrale :

$$\pi^{dT} = \frac{ak + h\pi^T}{1 + h} - \left( \frac{a}{1 + h + a^2} \right) e \quad (\text{A.12})$$

avec  $\frac{ak + h\pi^T}{1+h}$  le biais inflationniste et  $\frac{a}{1+h+a^2}$  la réponse stabilisatrice au choc d'offre. En posant  $\pi^T = \pi^* = 0$ , la cible assignée correspond au taux socialement optimal. En comparant avec (A.8), le biais inflationniste est réduit de  $ak$  en discréption à  $\frac{ak}{1+h}$  en discréption avec cible, mais la réaction aux chocs de la banque centrale est réduite de  $\frac{a}{1+a^2}$  à  $\frac{a\lambda}{1+h+a^2\lambda}$  : c'est l'*arbitrage entre crédibilité et flexibilité* (ou responsabilisation et stabilisation). Cet arbitrage émerge entre la baisse du *niveau* de l'inflation (crédibilité ou responsabilisation) et la stabilisation de l'économie en présence de chocs (flexibilité). Plus le poids accordé à la cible est important, i.e. plus  $h$  est élevé, plus le biais inflationniste est réduit mais moins la banque centrale a de marge de manœuvre en présence de chocs. Notons que cet arbitrage émerge également lorsque la banque centrale est déléguée à un "banquier conservateur" (Rogoff (1985)).

En raison de cet arbitrage, la solution apportée n'est qu'un "*third-best*". Svensson (1997b) montre cependant qu'il est possible de supprimer cet arbitrage, de sorte que le biais inflationniste soit éliminé, sans distordre la réponse aux chocs. Le principal doit déterminer la cible  $\pi^T$  dans la fonction de perte (A.10) telle que la condition du premier ordre corresponde à (A.5). Par identification, les conditions du premier ordre (A.5) sous engagement et (A.12) en discréption "contrainte" avec une cible désignée sont identiques si  $\pi^T = \pi^* - ak$ . Attribuer à la banque centrale une cible d'inflation corrigée du biais inflationniste permet d'atteindre l'équilibre de *second-best*.

### I.3 La transparence sur les prévisions de la banque centrale comme parade au biais inflationniste : modélisation

Une transparence accrue de la politique monétaire amène également la banque centrale à éliminer le biais inflationniste, sans créer un arbitrage entre crédibilité et flexibilité. Cette idée est notamment défendue par Walsh (2003a,c), Svensson (1999, 2002), Kuttner & Posen (1999), Faust & Svensson (2001), Hellwig (2002). Nous développons ici le modèle de Walsh (2003a).

Soit une économie décrite par la fonction d'offre agrégée suivante :

$$\pi_t = \beta E_t(\pi_{t+1}) + \lambda x_t + e_t \quad (\text{A.13})$$

avec  $E(\cdot)$  l'opérateur d'anticipations rationnelles,  $x$  l'écart de production, i.e. l'écart entre le produit et son niveau naturel,  $0 < \beta < 1$  le taux d'actualisation,  $\lambda > 0$  l'élasticité de l'écart de production vis-à-vis de l'inflation et  $e$  un choc sur les prix, supposé non-autocorrélé. L'équation (A.13) correspond à la courbe de Phillips des Nouveaux Keynésiens selon laquelle l'inflation est un phénomène prospectif et le choc  $e$  introduit un arbitrage entre la stabilisation de l'inflation et celle de l'écart de production (voir Clarida et al. (1999)).

Les préférences de la société sont représentées par une fonction de perte usuelle  $L_t^S$  qui sanctionne les fluctuations de l'écart de production et de l'inflation, autour de leurs cibles respectives, supposées nulles :

$$L_t^S = \frac{1}{2} E_t \sum_{i=0}^{\infty} \beta^i (\lambda x_{t+i}^2 + \pi_{t+i}^2) \quad (\text{A.14})$$

avec  $\lambda > 0$  le poids relatif placé sur la stabilisation de l'écart de production.

La société délègue la politique monétaire à la banque centrale *via* un régime de ciblage de l'inflation, plaçant ce faisant l'autorité monétaire dans un cadre de discréption contrainte. Ce régime est défini par la cible  $\pi^T$  donnée à la banque centrale et par le poids accordé à cet objectif  $\theta$ . On cherche ainsi à établir le rôle joué par la transparence concernant les préférences de la banque centrale. On suppose que la banque centrale fait face à des pressions politiques expansionnistes modélisées par des fluctuations aléatoires de son objectif de production  $u$ , avec  $u$  un processus aléatoire centré. La banque centrale minimise donc la fonction de perte suivante :

$$L_t^{cb} = \frac{1}{2} E_t^{cb} \sum_{i=0}^{\infty} \beta^i [\lambda(x_{t+i} - u_{t+i})^2 + \pi_{t+i}^2 + \theta(\pi_{t+i} - \pi_{t+i}^T)^2] \quad (\text{A.15})$$

Pour simplifier, on suppose que la banque centrale fixe directement la demande  $x$ , conditionnellement à ses anticipations du choc  $e$ , notées  $e^{cb}$ . Les chocs de demande sont supposés observés parfaitement par la banque centrale mais le public ne peut observer les pressions  $u$ . On compare le cas où les prévisions de la banque centrale sur les chocs  $e$ , notées  $e^{cb}$ , sont inobservables et le cas où elles le sont.

**Cas où la banque centrale n'est pas transparente sur ses prévisions** Les prévisions de la banque centrale n'étant pas observables *ex post* par le public, la cible  $\pi^T$  ne peut dépendre de  $e^{cb}$ . Walsh (2003a) considère alors le cas d'une cible constante, supposée nulle. En minimisant (A.14) sous la contrainte de (A.13), on obtient la condition du premier ordre  $E^{cb}[\lambda(x_t - u_t) + \delta(1 + \theta)\pi_t] = 0$ . Par l'équation d'offre agrégée, on obtient les dynamiques d'équilibre de l'inflation et de l'écart de production :

$$\pi_t = \left( \frac{\lambda\delta}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) u_t + \left( \frac{\lambda}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) e_t^{cb} + v_t \quad (\text{A.16})$$

$$x_t = \left( \frac{\lambda}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) u_t - \left( \frac{\delta(1 + \theta)}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) e_t^{cb} \quad (\text{A.17})$$

avec  $v$  l'erreur de prévision de la banque centrale du choc  $e$ .

Les premiers termes de (A.16) et (A.17) traduisent le biais inflationniste résultant des pressions expansionnistes  $u$ . Les seconds traduisent la réaction de la banque centrale à son anticipation des chocs  $e$ . Un arbitrage émerge : placer plus de poids sur la réalisation de la cible (i.e. un  $\theta$  fort) responsabilise la banque centrale en diminuant l'effet de  $u$  mais affecte la stabilisation de l'économie face aux chocs  $e$ . En insérant (A.16) et (A.17) dans (A.14) et en minimisant par rapport à  $\theta$ , on obtient le poids optimal à placer sur la réalisation de la cible :

$$\theta^* = \frac{(\lambda + \delta^2)\sigma_u^2}{\sigma_e^2 - \sigma_e^2 - \sigma_v^2} \quad (\text{A.18})$$

Ce poids est croissant avec  $\sigma_u^2$  qui représente l'intensité des pressions que subit la banque centrale et avec  $\sigma_v^2$  qui traduit la précision des prévisions de la banque centrale. Plus les pressions sont fortes ou moins la banque centrale a d'informations sur les chocs, plus le mandat privilégie la responsabilisation à la stabilisation conjoncturelle.

**Cas où la banque centrale est parfaitement transparente sur ses prévisions** Supposons maintenant que le public puisse observer *ex post* les prévisions  $e^{cb}$ . Il peut alors, dans le cadre du processus de délégation, assigner une cible à la banque centrale qui dépend des chocs anticipés  $\pi_t^T = \tau e_t^{cb}$  avec  $\tau > 0$  une constante à déterminer pour établir complètement le mandat de la banque centrale. De manière analogue à précédemment, on minimise (A.15) avec  $\pi_t^T = \tau e_t^{cb}$  sous contrainte de (A.13). La condition de premier ordre obtenue réintroduite dans (A.13) donne les dynamiques d'équilibre de  $\pi$  et  $x$  :

$$\pi_t = \left( \frac{\lambda\delta}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) u_t + \left( \frac{\lambda + \theta\delta^2\tau}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) e_t^{cb} + v_t \quad (\text{A.19})$$

$$x_t = \left( \frac{\lambda}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) u_t - \delta \left( \frac{\theta(1 - \tau) + 1}{\lambda + \delta^2(1 + \theta)} \right) e_t^{cb} \quad (\text{A.20})$$

En intégrant (A.19) et (A.20) dans (A.14) et en minimisant par rapport à  $\theta$ , on obtient la condition de premier ordre :

$$\theta^* = \frac{\lambda}{\lambda + \delta^2} \quad (\text{A.21})$$

et en cherchant à minimiser par rapport à  $\tau$ , on trouve que  $\frac{\partial E(L^S)}{\partial \tau} < 0$ . Cette dernière condition implique un poids optimal sur la réalisation de l'inflation infini. Dans ce cas, Walsh (2003a) parle d'un régime de ciblage de l'inflation pur<sup>1</sup>. La fonction de perte de la banque centrale se réduit à :

$$L_t^{cb} = \frac{1}{2} E_t^{cb} (\pi_t - \pi_t^T)^2 \quad (\text{A.22})$$

et la banque centrale s'assure toujours que ses prévisions d'inflation soient ancrées sur la cible, i.e.  $E^{cb}(\pi_t) = \pi_t^T$ . En intégrant (A.21) dans (A.19) et (A.20) avec  $\tau \rightarrow \infty$ , on obtient l'équilibre macroéconomique suivant :

$$x_t = - \left( \frac{\delta}{\lambda + \delta^2} \right) e_t^{cb} \quad (\text{A.23})$$

$$\pi_t = \left( \frac{\lambda}{\lambda + \delta^2} \right) e_t^{cb} \quad (\text{A.24})$$

Cet équilibre correspond à celui délivré par une politique d'engagement sur une règle optimale

1. Il ne s'agit pas d'un régime strict au sens de Svensson (1997a), i.e. un mandat qui ne se préoccupe que de la stabilisation de l'inflation, autrement dit  $\lambda = 0$  dans (A.14) (cf. section 2.1.). En effet, la cible  $\pi_t^T$  peut dépendre d'autres variables macroéconomiques, comme par exemple l'écart de production.

dans le même contexte (voir Clarida et al. (1999)).

Cadre théorique (principales hypothèses)	Rôle du ciblage de l'inflation	Effets macroéconomiques	Robustesse	Principales références
Incohérence temporelle (fonction de perte avec pressions expansionnistes, fonction d'offre à la Lucas, intérêt à surprendre le public)	cible explicite et transparence comme mécanisme d'engagement, effet incitatif, discréetion contrainte	baisse du niveau de l'inflation (élimination du biais), élimination de l'arbitrage crédibilité/ flexibilité	théorique-ment forte (mais remise en cause par le nouveau paradigme)	Svensson (1997b, 1999) Walsh (1995, 1999, 2003a,b) Bernanke et al. (1999) King (1997), Hellwig (2002) Faust & Svensson (2001, 2002) Kuttner & Posen (1999) Kuttner (2004)
Jeux de coordination (complémentarités stratégiques, asymétrie et hétérogénéité de l'information, anticipations rationnelles)	la cible comme un point focal, effet d'information cordonnateur, <i>guidance</i>	baisse de la volatilité des anticipations et de la variabilité macroéconomique	variable (dépend des hypothèses)	Morris & Shin (2002) Hellwig (2004) Demertzis & Viegi (2008, 2009) Ueda (2010) James & Lawler (2011)
Modèle <i>forward-looking</i> (produit déterminé par la demande, asymétrie d'informations entre banque centrale/public, anticipations rationnelles, rendre la politique monétaire prédictible)	transparence sur analyse et décisions diminue l'incertitude, effet d'information	meilleure efficacité de la politique monétaire, baisse de la volatilité macroéconomique, élimination du biais d'opacité	variable (dépend du type de chocs et de la qualité de l'information)	Hellwig (2004), Walsh (2006, 2007, 2008), Cornand & Heinemann (2008), Cornand & Baeriswyl (2010), Rudebusch & Williams (2008), Gosselin et al. (2008), Dale et al. (2011)
Apprentissage, rationalité limitée, asymétrie d'informations	cible comme heuristique, transparence comme aide à l'apprentissage et à la formation des anticipations, effet d'information	baisse de la variabilité macroéconomique (élimination du biais d'apprentissage), convergence facilitée vers l'équilibre en anticipations rationnelles	très forte	Orphanides & Williams (2005, 2007) Eusepi (2005), Brzoza-Brzezina & Kot (2008) Dennis & Ravenna (2008) Brazier et al. (2008), Canzian (2009) Eusepi & Preston (2010) De Grauwe (2011)

Tableau A.1 – Classification de la littérature théorique sur les propriétés du ciblage de l'inflation – 1995 / 2011



ANNEXE B

**Annexes au chapitre 2**

---



# I Pseudo-code du modèle computationnel

## Initialisation

1. Créer  $n$  ménages et initialiser leurs variables personnelles (stratégies et dotations) ;
2. Créer une firme et initialiser ses variables personnelles (stratégie, prix, quantités) ;
3. Initialiser les variables agrégées et les paramètres du modèle ;

## Déroulement des événements

4. tant que  $t \leq T$  ( $T$  est le nombre total de périodes du run) :
  - (*Marché du travail*)
    - (a) Ordonner les  $n$  ménages par  $w_{i,t}^d$  croissants :  $(l_1, \dots, l_n)$  ;
    - (b) Mettre  $h_{l_i,t} = 1$  tant que  $i \leq H_t^d$ ,  $h_{l_i,t} = 0$  ensuite ;
    - (c) Calculer les grandeurs agrégées  $H_t$ ,  $u_t$  et  $W_t$  ;
  5. Calculer l'offre de bien correspondante  $Y_t^s \equiv H_t^{1-\alpha}$  et son prix  $P_t$  ;
  6. Calculer les revenus (réels) de chaque ménage  $y_{i,t}$ , sa demande pour le bien  $c_{i,t}^d$  et son épargne/endettement  $b_{i,t}$ ,  $\forall i$  ;
    - (*Marché du bien*)
      - (a) Ordonner les  $n$  ménages par  $c_{i,t}^d$  décroissante :  $(g_1, \dots, g_n)$  ;
      - (b) Mettre  $c_{g_i,t} = \frac{c_{g_i,t}^d}{P_t}$  et passer à  $i = i + 1$  tant que  $c_{g_i,t}^d > 0$ , arrêter si  $\sum c_{g_i,t} \geq Y_t^s$  ;
      - (c) Calculer les quantités de bien vendues  $Y_t$ , les profits de la firme  $\Pi_t$ , l'utilité de chaque ménage  $u_{i,t}$ , son épargne résiduelle  $b_{i,t} = b_{i,t} + c_{i,t}^d$ , le taux d'inflation  $\pi_t$  et les autres indicateurs globaux.
    - (a) pour chaque ménage  $i$ , mettre en oeuvre l'apprentissage sur  $(\gamma_{i,t}^w, \gamma_{i,t}^k)$  :
      - i. réviser le couple de stratégies par imitation, avec une probabilité  $P_{imit}$ ,
      - ii. réviser le couple de stratégies par tirage aléatoire, avec une probabilité  $P_{mut}$
    - (b) Ajuster la demande de travail de la firme ;
    - (c) Fixer le taux d'intérêt  $i_t$  en fonction de  $u_t$  et  $\pi_t$  ;
    - (d) Exécuter les étapes (4) à (8).

## II Grille de lecture des outils d'analyse utilisés

Cette section explicite les méthodes que nous retenons pour obtenir des résultats du modèle ainsi que les outils que nous mobilisons pour les analyser et les présenter dans la suite du travail. En particulier, nous utilisons systématiquement une méthode d'échantillonnage économique et efficace tirée de la méthode des plans d'expérience (*design of experiments*) – un *hypercube latin presque orthogonal (near-orthogonal latin hypercube)* (Cioppa (2002)). Pour l'analyse de sensibilité du modèle présentée dans le chapitre suivant, nous associons cette méthode d'échantillonnage à un métamodèle d'interpolation linéaire adapté des géostatistiques permettant d'approximer le vrai comportement du modèle – le *kriging* (ou krigage, voir Matheron (1963)). Ces deux outils sont détaillés successivement ci-après<sup>1</sup>. Leurs fondements ainsi que deux applications au modèle de Nelson & Winter (1982) et à l'oligopole de Cournot sont également présentés dans Salle & Yıldızoglu (2012). Nous donnons ensuite une grille de lecture de quelques outils statistiques auxquels nous avons aussi largement recours.

### II.1 La méthode des plans d'expérience

#### II.1.1 Motivation

Comme il a été expliqué à la section I du chapitre 2, les modèles à base d'agents ne contiennent pas de solution analytique et leurs résultats sont obtenus par simulation. Concrètement, il s'agit de lancer le programme informatique et de sauvegarder la valeur des variables qui sont d'intérêt pour notre question de recherche. Cependant, notre modèle est non-déterministe : l'initialisation des variables des agents ainsi que le processus d'apprentissage impliquent des tirages aléatoires. Les résultats sauvegardés varient d'une exécution du programme à l'autre. Il nous faut alors relancer le programme plusieurs fois pour que les données sauvegardées soient représentatives de la dynamique du modèle. De plus, la section III a souligné le grand nombre de paramètres que comporte notre modèle. Les résultats du modèle dépendent aussi des valeurs auxquelles ont été fixés ces paramètres. Pour que la portée des résultats obtenus soit la plus générale possible, il ne nous est pas permis de restreindre *a priori* de manière arbitraire ces valeurs. Nous devons, au moins dans un premier temps, envisager toutes les configurations réalistes.

Une solution consiste à lancer un grand nombre de fois le programme en faisant varier l'ensemble des paramètres. C'est le cas des simulations type Monte Carlo. Cependant, si, comme dans notre cas, le nombre de paramètres et leurs domaines de variation sont grands, le nombre de simulations à effectuer pour obtenir un échantillon représentatif d'observations peut devenir très élevé. Si on suppose, par exemple, que chacun des 14 paramètres de notre modèle ne peut prendre que 3 valeurs, ceci correspond déjà à  $3^{14}$ , soit un peu moins de 5 millions de combinaisons différentes. Nos simulations étant non-déterministes, il serait en plus nécessaire de répliquer ces différentes combinaisons pour couvrir de manière significative l'ensemble de l'espace des paramètres. Ce dispositif devient vite prohibitif compte tenu du temps de calcul des simulations.

La méthode des plans d'expériences nous est apparue comme une alternative intéressante<sup>2</sup>. Elle permet de minimiser la taille de l'échantillon de configurations de paramètres à tester sous la contrainte de la représentativité par rapport à l'ensemble des configurations possibles. Les principaux termes sont définis et illustrés avant d'étayer le choix de notre plan d'expérience et sa construction.

---

1. Bien que séparées en deux points dans l'exposé ci-dessous pour des raisons de clarté, la question de l'échantillonnage et celle du choix de la méthode d'analyse des données sont étroitement liées (Sacks et al. (1989)).

2. Voir Goupy & Creighton (2007) pour une présentation pédagogique. Cette méthode est largement répandue dans de nombreux domaines (industrie, chimie, mécanique, électronique, médecine, biologie, informatique...). A notre connaissance, les seules applications en économie de la méthode des plans d'expérience sont Oeffner (2008), Yıldızoglu et al. (2012) et Salle & Yıldızoglu (2012). Notre travail est largement inspiré par la démarche méthodologique de Oeffner (2008).

### II.1.2 Définitions préalables

**Variables-entrées ou facteurs ou inputs** Il s'agit des paramètres du modèle dont on veut estimer l'influence sur le comportement du modèle. Soit  $\{x_1, \dots, x_k\}$  l'ensemble des  $k$  paramètres. Notre modèle en contient 14 ( $k = 14$ ), mis en évidence tout au long de la section III.

**Variable-réponse ou réponse** C'est la variable qui résume le comportement du modèle qui nous intéresse, sur laquelle on cherche à montrer l'influence des facteurs. Soit  $y$  cette variable. Notre modèle étant axé sur la politique monétaire, une de ces variables peut être la valeur de l'inflation par exemple.

**Domaine de variation d'un facteur** Il s'agit de l'ensemble des valeurs que peut prendre un facteur. Par exemple, le domaine de variation du paramètre de rendements d'échelle  $\alpha$  est  $[0, 1[$ .

**Domaine d'expérimentation** Il s'agit de l'espace à  $k$  dimensions formé par les domaines de variation de chaque facteur. On le note  $D \in R^k$ . Par exemple, si on a deux facteurs dont le domaine de variation est  $[0, 1]$  pour chacun, le domaine d'expérimentation est un carré, noté  $D = [0, 1]^2$ .

**Point d'expérimentation** Un point d'expérimentation est un point du domaine d'expérimentation. C'est un vecteur  $(1 \times k) \in D$ . Il correspond à une configuration particulière des facteurs choisie dans leur domaine de variation respectif, par exemple  $\mathbf{x} = \{0.5; 0.5\} \in D$  dans l'exemple précédent. On note un point  $\mathbf{x} \in D$ .

**Plan d'expérience** C'est l'ensemble des points d'expérimentation retenus dans l'échantillon des configurations possibles. Soit  $P = \{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$  un tel plan à  $n$  points. On peut l'écrire sous la forme d'une matrice de facteurs  $\mathbf{X}$  de format  $(n \times k)$ , où chaque colonne représente une variable et chaque ligne représente une combinaison de facteurs pour un run, i.e. un point d'expérimentation. Les plans d'expérience utilisés dans le travail de thèse sont représentés sous la forme matricielle.

**Expérience numérique (ci-après expérience) ou simulation** On lance une simulation ou expérience lorsqu'on exécute le programme une fois avec une configuration donnée des paramètres. Les paramètres sont fixés de manière différente d'une simulation ou expérience à l'autre.

**Run ou réPLICATION** On lance plusieurs runs d'une simulation lorsqu'on lance plusieurs fois le programme avec une même configuration de paramètres. Il s'agit de répliquer une expérience. Cette réPLICATION est nécessaire dans le cas de simulations non-déterministes, impliquant des tirages aléatoires notamment.

Notre problème est ainsi de construire un plan d'expériences à partir de nos facteurs et de leur domaine de variation respectif, i.e. de choisir les points d'expérimentation pour couvrir de manière efficace le domaine d'expérimentation. Nous exposons maintenant les propriétés que ce plan doit satisfaire.

### II.1.3 Propriétés du plan recherchées

Cioppa (2002) identifie plusieurs propriétés désirables du plan : i) Les facteurs doivent être orthogonaux ; ii) Les points sélectionnés doivent occuper de manière représentative le domaine d'expérimentation (*space-filling property*) ; iii) Il doit pouvoir permettre d'inclure un grand nombre de facteurs, tout en restant facile à générer ; iv) Il doit être construit avec le minimum de restrictions a priori sur la relation entre les facteurs et la variable réponse. Cette dernière propriété assure que les données récoltées grâce au plan peuvent ajuster un grand nombre de modèles d'estimation des effets

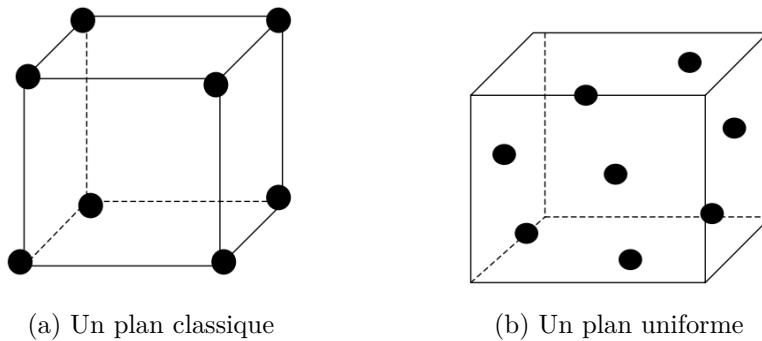


FIGURE B.1 – Exemples de plan d’expérience (trois facteurs et 8 points, source : Goupy & Creighton (2007))

des facteurs sur la réponse afin d’identifier les effets individuels des facteurs, linéaires ou non ainsi que leurs interactions. Nous nous concentrons sur les deux premières propriétés puis présentons le plan construit pour les satisfaire toutes deux : un hypercube latin presque orthogonal. Ce plan remplit par ailleurs les deux autres propriétés mentionnées.

**L’orthogonalité** Un plan  $\mathbf{X}$  est orthogonal si chaque paire de colonnes a un coefficient de corrélation nul. Ye (1998) ajoute aussi la condition que les éléments au carré de chaque paire de colonne ainsi que leur produit croisé doivent être non-correlés. Cette propriété est importante pour l’analyse des résultats. Elle assure que les estimations des effets linéaires des facteurs sont non-correlées entre elles, ainsi qu’avec les estimations des effets quadratiques et des interactions deux à deux des facteurs. En effet, supposons que le modélisateur souhaite ajuster aux données un modèle linéaire polynomial :

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \beta_{i,j} x_i x_j + \varepsilon \quad (\text{B.1})$$

avec  $\varepsilon$  un terme d’erreur aux propriétés habituelles. La précision de l’estimation des coefficients  $\beta$  peut être entachée par la multicolinéarité des facteurs  $x$ . Ce problème est évité par construction si le plan est orthogonal.

**La couverture du domaine d’expérimentation** Les points d’expérimentation doivent être répartis de manière uniforme dans le plan, laissant un minimum de régions non-échantillonnées (cf. figure B.1b). Ce critère est d’autant plus important que le modélisateur vise une vaste exploration du modèle sans connaissance précise *a priori* sur la forme de la relation entre les facteurs et la réponse (Fang et al. (2000)). Si la relation entre les facteurs et la réponse est irrégulière, on risque de passer à côté de relations intéressantes dans des zones du domaine d’expérimentation mal couvertes. Par exemple, lorsque les points sont placés aux extrémités du domaine, les éventuelles irrégularités à l’intérieur du domaine expérimental ne peuvent être appréhendées. C’est le cas des plans dits classiques, tels que les plans factoriels, les plans composites, les plans Box-Benken (cf. figure B.1a). Pour cette raison, la méthode d’interpolation linéaire que nous développons ci-dessous – le kriging – ne peut pas être appliquée à un plan non-uniforme. Les plans classiques ne permettent d’ajuster que des modèles de la forme de (B.1) (Jourdan (2005)). Cependant, les hypercubes latins permettent également leur ajustement.

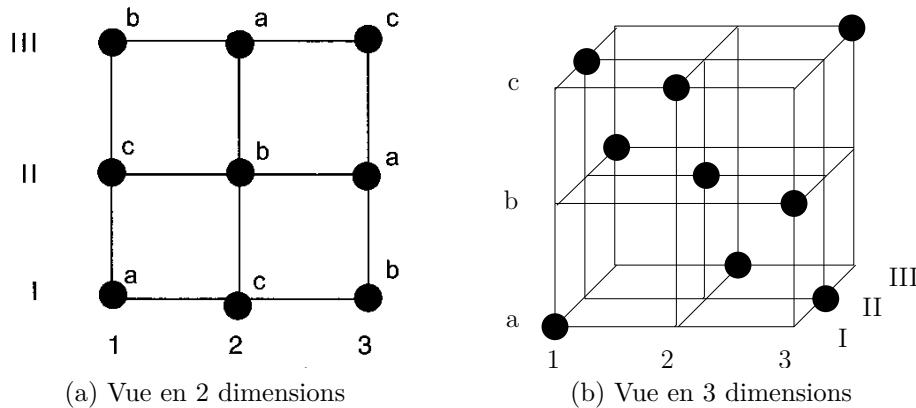


FIGURE B.2 – Un carré latin à trois facteurs pouvant prendre chacun trois valeurs (source : Goupy & Creighton (2007))

#### II.1.4 Les hypercubes latins presque orthogonaux

Cioppa (2002) développe des plans, dits *hypercubes latins presque orthogonaux* qui permettent de combiner de manière efficiente les deux propriétés ci-dessus. Nous détaillons la manière dont ces plans sont construits.

**Exemple introductif : le carré et le cube latins** Illustrons d'abord la construction d'un carré latin avec 3 facteurs pouvant chacun prendre 3 valeurs. On part d'un plan en deux dimensions (un carré) représentant les valeurs des paramètres *A* (chiffres arabes) et *B* (chiffres romains). On attribue ensuite les trois lettres latines<sup>3</sup> *a*, *b* et *c* correspondant aux trois niveaux du facteur *C* de telle manière qu'on trouve *a*, *b* et *c* sur toutes les lignes et toutes les rangées sans qu'il y ait deux fois la même lettre (cf. figure B.2a). Douze arrangements sont possibles, on en choisit un de manière aléatoire. Le plan comporte alors ces 9 points au lieu des  $3^3 = 27$  points totaux<sup>4</sup>. Ce plan peut être représenté en trois dimensions, on parle alors d'un cube (cf. figure B.2b).

Le principe de calcul peut s'appliquer au domaine d'expérimentation lui-même et non directement aux points d'expérimentation. Prenons un plan à deux facteurs prenant chacun trois niveaux. On divise les axes des deux facteurs en trois zones de longueur égale de sorte d'obtenir 9 carrés. On sélectionne trois de ces 9 carrés de sorte qu'ils n'aient aucune arrête adjacente entre eux. Il y a 6 possibilités (cf. figure B.3). On place dans chacun des carrés choisi un point d'expérimentation, soit de manière aléatoire, soit au centre. Si on transpose cet exemple à un plan de trois paramètres prenant chacun 3 niveaux, on obtient un cube. Les trois axes sont partagés en trois zones, on obtient alors 27 petits cubes. On choisit autant de petits cubes qu'il y a de facteurs (trois dans cet exemple) de sorte qu'ils n'aient pas de surface adjacente entre eux : on obtient un cube latin. De même, les points de calcul sont placés dans les cubes sélectionnés (cf. figure B.4). Lorsque le nombre de facteurs, donc de dimensions du domaine d'expérimentation est strictement supérieur à 3, on parle d'hypercubes.

**Propriétés de l'hypercube latin presque orthogonal** Un avantage des hypercubes latins est qu'ils satisfont au critère de *non-collapsing* qui assure que l'on ne teste pas deux fois la même expérience. Dans notre exemple à deux facteurs (cf. figure B.3), si l'un des deux facteurs ne joue pas, les 3 carrés se projettent sur les trois zones du facteur restant. Dans notre exemple à 3 facteurs, si un des

3. D'où la dénomination de carrés *latins*.

4. Le plan à 27 points est appelé "plan complet" et le plan à 9 points "plan fractionnaire" dans le langage de la planification des expériences.

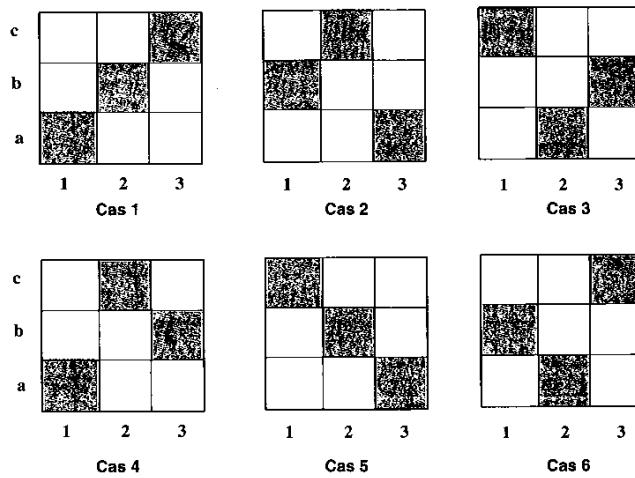


FIGURE B.3 – Principe de division de l'espace expérimental, cas à deux dimensions (Goupy & Creighton (2007))

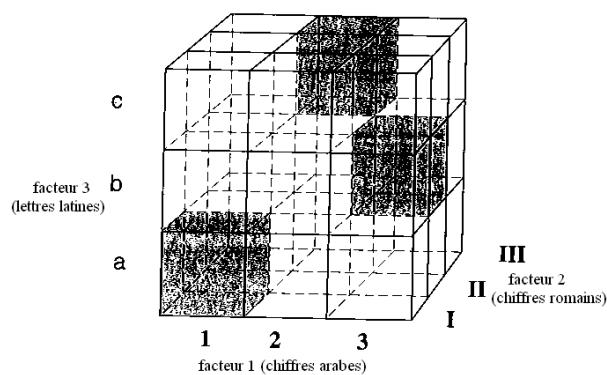


FIGURE B.4 – Principe de division de l'espace expérimental, cas à trois dimensions (Goupy & Creighton (2007))

trois facteurs n'est pas influent, les deux autres forment un plan d'expérience à deux dimensions. Il faut alors éviter que deux points d'expérience se trouvent superposés dans cet espace à deux dimensions. Les hypercubes latins répondent à ce critère.

De plus, ils permettent d'échantillonner l'ensemble de l'espace des paramètres, ce sont des plans *uniformes*. Ils assurent que chaque facteur a toutes ses valeurs possibles représentées et permettent ainsi de découvrir des comportements intéressants (Sacks et al. (1989)).

Cependant, ils ne sont pas en principe orthogonaux. Ye (1998) a développé une méthode de construction d'hypercubes latins qui respectent en plus le critère d'orthogonalité : on parle d'hypercubes latins orthogonaux. Cependant, le respect du critère d'orthogonalité s'obtient au détriment des capacités du plan à couvrir le domaine d'expérimentation. Cioppa (2002) développe, à partir des travaux de Ye (1998), une méthode qui permet de parvenir à un arbitrage efficace entre ces deux propriétés, tout en limitant le nombre de runs nécessaire à l'obtention d'un échantillon représentatif et en incluant un grand nombre de facteurs. Le critère d'orthogonalité est assoupli, on parle de plans presque orthogonaux<sup>5</sup>. Les résultats sont impressionnantes : Cioppa (2002) montre qu'il est possible d'identifier des relations non-linéaires et des interactions de manière significative avec 33 runs seulement pour 11 facteurs, 65 pour 16, 129 pour 22 et 257 pour 29. La feuille Excel fournissant le détail des points à expérimenter jusqu'à 29 facteurs est donnée par Sanchez (2005). Dans la suite du travail, nous avons systématiquement recours à ce dispositif pour échantillonner l'espace des paramètres de notre modèle<sup>6</sup>. Pour analyser les données issues de cette démarche, nous présentons maintenant une technique de métamodélisation d'interpolation.

## II.2 L'estimation d'un métamodèle par interpolation linéaire : le *kriging* (ou krigeage)

Considérons une réponse  $y : \mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k) \in D \in R^k \rightarrow y(\mathbf{x})$ . Lorsque le processus  $y$  est long et coûteux à évaluer, et ce d'autant plus que le nombre de points du domaine  $D$  est grand, on peut l'approximer par un processus aléatoire  $Y$ , appelé *métamodèle* (voir par exemple Wang & Shan (2007)). Nous utilisons un modèle de kriging et en présentons ici les fondements statistiques. Nous renvoyons le lecteur à Roustant et al. (2010) pour des illustrations de son utilisation avec le logiciel R Development Core Team (2009). Le kriging est en effet particulièrement bien adapté à l'analyse de simulations informatiques et l'exposé ci-dessous permet d'en comprendre ses attraits, par rapport notamment à la régression par moindres carrés ordinaires. L'intérêt de passer par une technique de métamodélisation adaptée réside dans la possibilité de disposer d'une formule de prédiction optimale du comportement du modèle en fonction de ses paramètres pour s'en servir ensuite dans des analyses complémentaires. Ainsi, au chapitre 3, nous nous en servons pour une analyse de la variance et au chapitre 4 pour une optimisation de la variable-réponse.

### II.2.1 Principe

Le but du kriging est de prédire de manière optimale pour chaque point  $x \in D \in R^k$  la réponse  $y(x) \in R$  par l'intermédiaire d'un processus aléatoire  $Y(x)$  ou métamodèle. Ce métamodèle est obtenu par une combinaison linéaire des  $n$  observations de  $y$ , notées  $(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n)$  dans le plan, i.e.  $(y(\mathbf{x}_1), \dots, y(\mathbf{x}_n))$ . On pose  $\forall x \in D \in R^k$  :

$$Y(x) = \mu(x) + Z(x) \quad (\text{B.2})$$

5. Typiquement, un plan est dit presque orthogonal si les paires de colonnes de la matrice  $X$  ont un coefficient de corrélation au plus égal à 0.03.

6. Notons que les plans fournis sont adaptés aux facteurs discrets. Les facteurs de notre modèle étant continus, il convient alors de discréteriser leur domaine de variation.

avec  $\mu : x \in D \subset R^k \rightarrow \mu(x) \in R$  une fonction de tendance et  $Z$  un processus aléatoire centré de matrice de variances-covariances  $C : (u, v) \in D^2 \rightarrow C(u, v) \in R$  définie par le modélisateur<sup>7</sup>.

Le kriging présente les caractéristiques suivantes, détaillées ci-après :

- C'est un *interpolateur exact*, autrement dit, le plan de régression passe par tous les points du plan d'expérience. On a donc  $Y(\mathbf{x}) = y(\mathbf{x})$ . Cette propriété est très intéressante pour l'analyse des simulations numériques déterministes. Nous pouvons néanmoins l'assouplir dans le cas de simulations non-déterministes.
- C'est un estimateur *global*, i.e. le métamodèle est valable sur l'ensemble du domaine expérimental.
- C'est un modèle *spatial*, i.e. le métamodèle donne plus de poids aux observations proches du point à évaluer.

### II.2.2 Le kriging simple ou ordinaire : cas où le processus $\mu(x)$ est une constante

Lorsque la tendance  $\mu$  est une constante connue,  $\mu(x) = \bar{\mu}$ , i.e. lorsque la moyenne du processus  $Y$  est connue (égale à  $\bar{\mu}$ ), on parle de kriging simple (KS). On considère alors le processus  $Y$  centré, i.e.  $(Y(x) - \bar{\mu})$ <sup>8</sup>. On obtient le meilleur estimateur linéaire sans biais (BLUP) de  $Y(x)$  basé sur les observations  $y(\mathbf{x})$  en trouvant les poids optimaux  $\lambda^*(\mathbf{x}) \in R^n$  qui minimisent l'erreur quadratique moyenne de l'estimation donnée par  $MSE(x) \equiv E[Y(x) - \lambda(x)'Y(\mathbf{x})]^2$ . La MSE étant convexe, la solution est unique et donnée par  $\lambda^*(x) = C^{-1}c(x)$  avec  $C = (C(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j))_{1 \leq i, j \leq n}$  la matrice de covariance de  $Y(\mathbf{x})$  et  $c(\mathbf{x}) = (C(x, \mathbf{x}_i))_{1 \leq i \leq n}$  le vecteur des covariances entre  $Y(x)$  et  $Y(\mathbf{x})$ . En remplaçant le vecteur aléatoire  $Y(\mathbf{x})$  par sa réalisation  $y$  et  $\lambda(x)$  par les poids optimaux  $\lambda^*(x)$ , on obtient l'estimateur moyen du KS  $m_{KS}(x) = c(x)'C^{-1}y$  et sa variance  $s_{KS}^2(x) = C(x, x) - c(x)'C^{-1}c(x)$ . En généralisant au cas où la moyenne de  $Y$  est non-nulle, on a :

$$m_{KS}(x) = \bar{\mu} + c(x)'C^{-1}(y - \mu) \quad (\text{B.3})$$

$$s_{KS}^2(x) = C(x, x) - c(x)'C^{-1}c(x) \quad (\text{B.4})$$

avec  $\mu = \mu(\mathbf{x})$  le vecteur des moyennes observées aux points d'expérimentation. Le processus  $Z(x) \equiv c(x)'C^{-1}(y - \mu)$  peut s'interpréter comme l'écart entre la régression présumée (ici une constante) et la réponse (cf. figure B.5). Les poids optimaux sont adaptés en fonction du point auquel on évalue la réponse contrairement aux modèles de régression qui estiment des valeurs fixées des paramètres. Les plus proches voisins ont davantage de poids dans l'estimation de la réponse à un point non-testé que les points plus éloignés. Ceci permet au kriging d'être plus flexible et de donner des estimations plus précises que la régression classique (van Beers & Kleijnen (2004)).

Lorsque la moyenne  $\mu$  est inconnue, on parle de kriging ordinaire (OK), la méthode est sensiblement la même (voir par exemple Armstrong & Carignan (2007) pour le détail des équations).

### II.2.3 Le kriging universel : cas où le processus $\mu(x)$ est une tendance quelconque

Dans le cas plus général où le processus  $\mu$  est de la forme  $\mu(x) = \sum_{j=1}^l \beta_j f_j(x)$ ,  $l > 0$ , avec  $f_j$  des fonctions fixées et  $\beta_j$  des coefficients inconnus, on parle de kriging universel (KU) : le but est de dériver la meilleure approximation linéaire de  $Y$  basée sur les observations  $Y(\mathbf{x})$  tout en estimant les paramètres  $\beta_j$ <sup>9</sup>. On montre que le BLUP de  $Y(x)$  est (voir par exemple Sacks et al. (1989) ou Jourdan

---

7. Nous revenons sur ce point ci-après.

8. Sans perte de généralité, on considère un processus de moyenne nulle, il est facile de généraliser au cas où la moyenne est non-nulle.

9. Lorsque les fonctions  $f_j$  se réduisent à une constante unique, i.e.  $\sum_{j=1}^l \beta_j f_j(x) = \bar{\mu}$ , on retrouve le cas du KO et la moyenne est estimée ainsi.

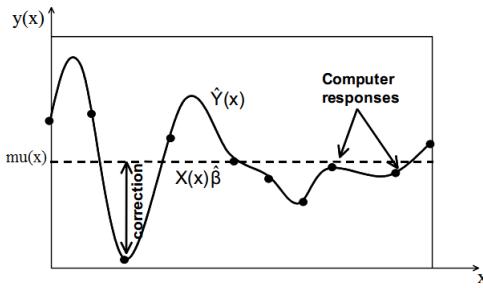


FIGURE B.5 – Comportement du métamodèle obtenu par kriging ordinaire (source : Jourdan (2005))

(2005)) :

$$\mu_{UK}(x) = f'(x)\hat{\beta} + c(x)'C^{-1}[y - F\hat{\beta}] \quad (\text{B.5})$$

$$s^2_{UK}(x) = s^2_{SK}(x) + (f(x)' - c(x)'C^{-1}F)'(F'C^{-1}F)^{-1}(f(x)' - c(x)'C^{-1}F) \quad (\text{B.6})$$

avec  $\hat{\beta} = (F'C^{-1}F)^{-1}F'C^{-1}y$  l'estimateur des moindres carrés généralisés (MCG)<sup>10</sup> de  $\beta$ ,  $F = (f(\mathbf{x}_1)', \dots, f(\mathbf{x}_n)')$  la matrice du plan et  $f(\mathbf{x})$  le vecteur des valeurs des tendances en  $\mathbf{x}$ . Les variances (B.4) et (B.6) tendent vers zéro lorsqu'on se rapproche des points d'expérience, i.e. le métamodèle  $Y$  donne les valeurs mesurées du processus  $y$  lorsqu'il est évalué aux points d'expérience : on retrouve la propriété d'interpolation exacte mentionnée plus haut. On remarque que la variance du KU (équation (B.6)) est plus grande que celle du KS (équation (B.4)) car l'estimation des paramètres  $\beta$  ajoute de l'incertitude au modèle. Les deux termes de (B.5) sont non-correlés. Le KU se résume alors à deux étapes : estimer par les MCG les coefficients de la tendance puis interpoler les résidus comme si il n'y avait pas de modèle de régression (Sacks et al. (1989)). Cependant, la fonction de corrélation  $C$  doit être précisée pour obtenir ces estimations.

#### II.2.4 Spécification de la covariance $C$

Le kriging est un estimateur spatial : par hypothèse, plus les points du domaine sont proches, plus leurs réponses seront positivement corrélées (van Beers & Kleijnen (2004)). La plupart du temps,  $Z$  est supposé stationnaire de second-ordre, de moyenne nulle et de matrice de variances-covariances  $C$  :  $(u, v) \in D^2 \rightarrow \sigma^2 R(u, v)$ , avec  $\sigma^2$  un paramètre d'échelle nommé la variance du processus. La matrice  $R$  est une matrice de corrélation de format  $n \times n$ , dont l'élément  $(i, j)$  correspond à  $\text{corr}(Z(x_i), Z(x_j))$ . Plus les points  $x_i$  et  $x_j$  sont proches, plus la corrélation  $\text{corr}(Z(x_i), Z(x_j))$  est forte.

Plusieurs fonctions de corrélation  $R$  sont couramment postulées, par exemple une fonction exponentielle :

$$\text{cov}[Y(x_i), Y(x_j)] = \prod_{g=1}^k \exp(-\theta_g |x_{i,g} - x_{j,g}|) \quad (\text{B.7})$$

ou une fonction gaussienne :

$$\text{cov}[Y(x_i), Y(x_j)] = \prod_{g=1}^k \exp(-\theta_g (x_{g,i} - x_{g,j})^2) \quad (\text{B.8})$$

avec  $k$  le nombre de facteurs,  $\theta_g$  traduisant l'importance relative des différents facteurs et  $x_{i,g}$  la valeur

10. Les MCG permettent de s'écartier de les hypothèses d'homoscédasticité et d'indépendance des résidus nécessaires à l'estimation par les MCO. La matrice de variances-covariances est alors une matrice symétrique définie positive quelconque (voir par exemple Dagnelie (2008)).

du facteur  $g$  dans la combinaison de facteur  $i$ . Le kriging est bien un estimateur spatial : la covariance entre les réponses tend vers zéro lorsque la distance entre les facteurs augmente. Il y a toujours une variation dans la réponse lorsque la distance est nulle. En géostatistiques, on parle d'effet pépite. Il représente le biais dû au métamodèle, i.e. la différence entre le vrai processus  $y$  et le métamodèle  $Y$ . Ce n'est pas un bruit blanc, comme supposé dans les régressions classiques puisque les réponses sont ici supposées corrélées. Ces fonctions de covariance fonctionnent avec l'hypothèse implicite que le processus  $Y$  est distribué suivant une loi normale de moyenne  $\mu(x)$ .

Une fois la forme de la fonction de covariance spécifiée, il faut ensuite estimer les paramètres  $\theta_g$ . En pratique, les paramètres  $\theta_g$  sont souvent estimés par le maximum de vraisemblance, sous des hypothèses gaussiennes. Par conséquent, le nombre

$$- 2 \ln(\hat{\beta}, \hat{\sigma}^2, \theta) = n \ln\left(\frac{2}{\pi}\right) + n \ln(\hat{\sigma}^2) + \ln(|R|) + \frac{1}{\hat{\sigma}^2} (y - \mathbf{1}\hat{\beta})' R^{-1} (y - \mathbf{1}\hat{\beta}) \quad (\text{B.9})$$

est un indicateur de la qualité d'estimation du modèle, et de faibles valeurs traduisent un bon ajustement ( $\mathbf{1}$  est un vecteur unité de dimension  $k$ ).

Des formes plus complexes de fonctions de covariances existent mais il faut prendre en considération que plus la fonction est complexe, plus il faut d'observations, donc de points d'expérience, pour estimer de manière précise ses paramètres. Les plans classiques disposent les points aux extrémités du domaine, seules les grandes distances sont appréhendées. Ils ne permettaient pas d'obtenir une estimation précise des paramètres de corrélation. C'est pour cette raison que nous avons dit plus haut qu'ils n'étaient pas adaptés à l'ajustement d'un modèle de kriging. Les plans adaptés au kriging doivent avoir de bonnes propriétés d'occupation de l'espace car des points régulièrement espacés offrent une meilleure couverture du domaine expérimental. C'est bien le cas de l'hypercube latin presque orthogonal. Les hypercubes latins ont aussi l'avantage de pouvoir ajuster également un modèle polynomial (Jourdan (2005)). Ainsi, le choix d'un hypercube latin nous apparaît pertinent dans la mesure où il ne nous restreint pas a priori sur le modèle d'analyse des résultats à adopter.

### II.2.5 Cas des simulations non-déterministes

Dans le cas de simulations non-déterministes, une même configuration de facteurs donne des réponses différentes. Le kriging est alors appliqué à la moyenne de la réponse sur l'ensemble des runs de chaque simulation (van Beers & Kleijnen (2004)). Le modèle comporte alors deux biais : un biais dû à l'ajustement du métamodèle au vrai processus (comme dans le cas de simulations déterministes) et une erreur expérimentale, i.e. un bruit dans la mesure de la réponse, dû aux aléas du modèle. Ainsi, pour un point  $x \in D$  donné, la réponse mesurée vaut  $\tilde{y}(x) = y(x) + \varepsilon$ . On fait l'hypothèse que  $\varepsilon_i \sim \text{nid}(0, \tau_i^2)$ . Pourvu que le processus  $Y$  et les erreurs  $\varepsilon$  soient indépendants, on obtient la moyenne et la variance du kriging de manière très similaire au cas des simulations déterministes. Il suffit de remplacer la matrice  $C^{-1}$  dans (B.3), (B.4), (B.5) et (B.6) par  $(C + \Delta)^{-1}$ , avec  $\Delta = \text{diag}(\tau_1^2, \dots, \tau_n^2)$  (voir par exemple Roustant et al. (2010)). Il n'y a qu'une différence majeure : les variances (B.4) et (B.6) sont plus élevées que dans le cas de réponses déterministes puisque le modèle a une erreur supplémentaire. Dans notre cas, les simulations sont non-déterministes à cause de l'initialisation et des tirages aléatoires de l'apprentissage des ménages. Nous répliquons alors plusieurs fois les configurations données par le plan d'expérience et pouvons donc mesurer la variance des réponses  $\tau_i^2$ ,  $i = 1, \dots, n$  pour les  $n$  observations de la variable réponse à chacun de  $n$  points. Ces variances sont introduites dans le modèle de kriging pour tenir compte de cette variabilité supplémentaire.

### II.2.6 Estimer la qualité du métamodèle

Il est possible d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle de kriging et de choisir la forme de la tendance, ou de la fonction de corrélation en fonction d'un critère d'optimalité. Deux méthodes sont

disponibles : la validation croisée et la validation externe.

La première consiste à retirer un ou plusieurs points du plan d'expérience et à réestimer le modèle de kriging sans ces points. On compare ensuite l'erreur entre l'estimation et la valeur observée aux points exclus de l'échantillon, selon le coefficient de prédictivité  $Q^2$  (voir Durrande et al. (2012)). Ce critère est une approximation du  $R^2$  des régressions linéaires habituelles et se calcule de la manière suivante<sup>11</sup> :

$$Q^2 \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^n n \left( y(\mathbf{x}_i) - \tilde{Y}(\mathbf{x}_i) \right)^2}{\sum_{k=1}^n n \left( y(\mathbf{x}_i) - \bar{y} \right)^2} \quad (\text{B.10})$$

où  $\bar{y}$  est la moyenne des  $y$  sur les  $n$  observations,  $\tilde{Y}(\mathbf{x}_i)$  est la valeur prédite de  $y$  aux points  $\mathbf{x}_i$  lorsque  $Y$  est estimé avec les  $n - 1$  points  $\mathbf{x}_{-i}$ . Les valeurs proches de zéro indiquent que le modèle a un pouvoir explicatif faible, alors que les valeurs proches de l'unité attestent de la qualité de l'estimation.

Cependant, en présence de peu de points, la validation croisée est d'un intérêt limité dans la mesure où les estimations du modèle peuvent être très sensibles à l'ajout ou au retrait d'un point du plan. On lui préfère ainsi la validation externe. Celle-ci requiert de disposer d'un échantillon de points du domaine expérimental dit échantillon de validation. On prélève la valeur de la réponse  $y$  à ces autres points et on retient la forme du modèle de kriging qui minimise l'erreur de prédiction sur cet échantillon de validation. On retient généralement un critère comme la minimisation de l'erreur quadratique moyenne sur l'ensemble des points supplémentaires. Nous utilisons la validation externe dans le chapitre 4 de la thèse.

**Utilisation du métamodèle** Dans le chapitre 3, nous nous servons du modèle de kriging comme métamodèle pour une analyse de la variance (ANOVA). L'ANOVA a pour but d'identifier l'influence de chacun des facteurs sur la réponse et d'isoler ceux qui ne l'affectent pas significativement. Dans ce cas, l'analyse de la variance est conduite sur le métamodèle  $Y$ , en tant qu'approximation de l'analyse de la variance du vrai modèle  $y$  (voir Jeong et al. (2005)).

Soit  $\mathcal{M}$  la moyenne de  $y$  sur  $D$  et  $\mathcal{V}$  la variance du modèle  $y$  :

$$\mathcal{M} \equiv \int \dots \int y(x) dx_1 \dots dx_k \quad (\text{B.11})$$

$$\mathcal{V} \equiv \int \dots \int [y(x) - \mathcal{M}]^2 dx_1 \dots dx_k \quad (\text{B.12})$$

L'effet principal de la variable  $x_g$  sur  $y$  (considérant que les autres facteurs sont fixés à la moyenne de leur ensemble de variation) est donné par :

$$m(x_g) \equiv \int \dots \int y(x) dx_1 \dots, dx_{g-1}, dx_{g+1}, \dots dx_k - \mathcal{M} \quad (\text{B.13})$$

et l'effet d'interaction deux-à-deux entre  $x_g$  et  $x_h$  s'écrit :

$$m(x_g, x_h) \equiv \int \dots \int y(x) dx_1 \dots, dx_{g-1}, dx_{g+1}, \dots dx_{h-1}, dx_{h+1}, \dots, dx_k - m(x_g) - m(x_h) \quad (\text{B.14})$$

et la sensibilité totale de la réponse au facteur  $x_g$  est donnée par  $M(x_g) \equiv m(x_g) + \sum_{g \neq h} m(x_g, x_h)$ .

Nous réalisons l'ANOVA des modèles de kriging à l'aide du logiciel JMP®. Le modèle retenu est un modèle de kriging ordinaire. La fonction de covariance retenue est la fonction gaussienne (équation (B.8)) et les paramètres  $\theta_g$  sont estimés par le maximum de vraisemblance. L'annexe III du chapitre 3 détaille un rapport d'un modèle de kriging en lien avec les fondements exposés ci-dessus.

11. Rappelons que le kriging étant un estimateur exact, il n'est pas possible de calculer le  $R^2$ .

Dans le chapitre 4, nous utilisons le métamodèle de kriging pour l'optimiser et déterminer la configuration de paramètres qui minimise ou maximise la variable-réponse. Nous réalisons cela avec le logiciel R Development Core Team (2009). Nous ne pouvons utiliser le logiciel R Development Core Team (2009) pour l'ANOVA car le package **R effects**, qui permet de représenter les effets marginaux des facteurs à partir d'une analyse de la variance n'est pas applicable à des objets de classe *km*, i.e. à des métamodèles obtenus par kriging (package **DiceKriging**). La notice de ce dernier package suggère une façon de connecter ce package au package **sensitivity**, qui permet de mener des analyses de sensibilité. Cependant, les sorties proposées sont plus limitées que celles proposées par **JMP®**, elles ne permettent pas notamment d'identifier clairement les effets d'interaction.

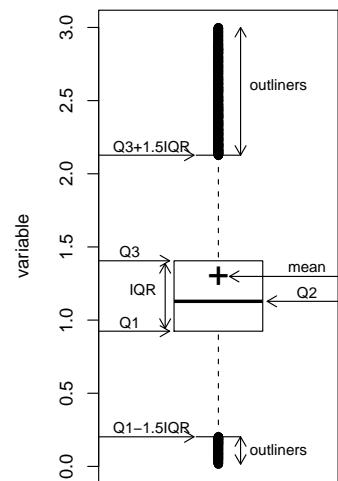
## II.3 Autres outils d'analyse

Nous présentons ici brièvement d'autres outils intégrés à l'analyse subséquente qui ne sont pas nécessairement familiers au lecteur.

### II.3.1 Boîtes à moustaches ("boxplot")

Nous avons souvent recours à des boîtes à moustaches, réalisées par le logiciel R Development Core Team (2009).

Une boîte à moustaches permet de résumer la répartition d'une variable dans un échantillon. Cet outil de statistique descriptive présente l'avantage d'être concis et de ne nécessiter aucune hypothèse a priori sur la distribution de probabilité de la variable (voir McGill et al. (1978)). Il donne une représentation non paramétrique de la variable à travers 5 statistiques : le bas et le haut de la boîte représentent  $Q_1$  et  $Q_3$  (le premier et le troisième quartile), la bande en gras représente la médiane ( $Q_2$ ) et l'extrémité des moustaches montrent le minimum et le maximum. Notons que nous excluons en général les observations "outliers" dans le but de rendre le graphique plus lisible. Dans ce cas, sauf mention contraire, les extrémités des moustaches représentent respectivement  $Q_1 - 1.5 \times IQR$  et  $Q_3 + 1.5 \times IQR$ , avec  $IQR = Q_3 - Q_1$  l'intervalle interquartile qui contient la moitié des observations. Nous ajoutons également la moyenne de l'échantillon, représentée par une croix "+". L'espace entre les différentes parties de la boîte ainsi que la longueur des moustaches traduit le degré de dispersion des variables. La figure II.3.1 illustre l'explication ci-dessus.



**FIGURE B.6 – Interpréta-**  
**II.3.2 l'une boîte à mous-**  
**taches**

Nous utilisons également des arbres de régression et de classification (*Classification And Regression Tree* ou algorithme CART, voir Breiman et al. (1984)). Il s'agit d'un outil d'exploration des données particulièrement lisible. L'espace des paramètres est divisé selon un algorithme de partitionnement récursif. Les extrémités des branches donnent la valeur espérée de la variable-réponse pour chaque sous-ensemble des valeurs de paramètres et l'effectif correspondant. En règle générale, les branches sont organisées de sorte que les valeurs espérées soient représentées de manière croissante de gauche à droite. Le critère de segmentation est la décomposition de la variance : chaque division maximise la variance inter-classes de chacune des deux classes réalisées. Chaque classe correspond à un noeud. Sauf mention contraire, la règle d'arrêt de la procédure est atteinte quand le facteur coût-complexité

atteint 1%. Ceci signifie que chaque division doit améliorer l'ajustement global du modèle d'un facteur d'au moins 1%, i.e. si une division supplémentaire ne permet pas d'augmenter le  $R^2$  du modèle d'au moins 0.01, la branche s'arrête là. Lorsque cette règle s'applique sur chaque branche, l'arbre final est obtenu. Ces arbres sont réalisés avec le package `rpart` du logiciel R Development Core Team (2009) (voir Therneau & Atkinson (1997)).



ANNEXE C

## Annexes au chapitre 3

---



## I Plans d'expérience utilisés

exp.	$\mu$	$\alpha$	$b_0$	$k$	$\bar{k}$	$\rho$	$\pi^T$	$\varepsilon$	$P_{imit}$	$P_{mut}$	$\sigma_{mutW}$	$\sigma_{mutK}$	$\phi_\pi$	$\phi_u$
1	0.72	0.00	4.00	0.20	1.20	0.70	0.04	0.10	0.24	0.07	0.28	0.47	0.40	0.60
2	0.95	0.40	2.00	0.30	1.40	0.20	0.03	0.15	0.18	0.09	0.39	0.25	0.50	0.30
3	0.89	0.20	10.00	0.20	1.40	0.80	0.02	0.10	0.11	0.06	0.40	0.44	0.90	0.50
4	0.64	0.40	7.00	0.30	1.20	0.40	0.02	0.06	0.04	0.10	0.45	0.32	0.20	0.20
5	0.92	0.20	3.00	0.10	1.20	0.10	0.02	0.13	0.16	0.05	0.04	0.42	1.30	0.60
6	0.53	0.50	3.00	0.30	1.20	0.60	0.02	0.17	0.22	0.02	0.21	0.39	1.80	0.10
7	0.77	0.10	6.00	0.10	1.30	0.30	0.05	0.09	0.05	0.05	0.18	0.45	1.90	0.70
8	0.81	0.40	9.00	0.20	1.40	0.80	0.04	0.01	0.07	0.04	0.02	0.32	1.40	0.00
9	0.69	0.00	1.00	0.40	1.50	0.50	0.03	0.03	0.20	0.04	0.42	0.20	0.70	0.20
10	0.97	0.30	5.00	0.40	1.10	0.30	0.05	0.08	0.17	0.01	0.34	0.03	0.80	0.80
11	0.52	0.00	10.00	0.30	1.30	0.40	0.02	0.14	0.01	0.03	0.36	0.10	0.40	0.00
12	0.98	0.30	7.00	0.50	1.30	0.10	0.03	0.16	0.09	0.04	0.27	0.13	0.90	0.60
13	0.55	0.10	4.00	0.40	1.50	0.40	0.02	0.06	0.24	0.10	0.08	0.03	2.00	0.20
14	0.78	0.30	5.00	0.50	1.30	0.90	0.01	0.01	0.13	0.06	0.13	0.16	1.00	0.70
15	0.58	0.20	8.00	0.50	1.50	0.20	0.03	0.19	0.04	0.08	0.01	0.22	1.90	0.30
16	0.67	0.30	6.00	0.40	1.20	0.90	0.05	0.12	0.12	0.08	0.19	0.06	1.40	1.00
17	0.86	0.20	5.00	0.20	1.70	0.90	0.04	0.19	0.15	0.06	0.16	0.15	0.80	0.60
18	0.56	0.40	3.00	0.20	1.60	0.40	0.04	0.16	0.10	0.08	0.06	0.01	0.00	0.10
19	0.73	0.20	6.00	0.20	1.80	0.80	0.01	0.09	0.14	0.08	0.25	0.05	0.40	0.90
20	0.61	0.40	9.00	0.10	1.60	0.20	0.03	0.04	0.21	0.09	0.03	0.22	0.30	0.30
21	0.83	0.10	5.00	0.10	2.00	0.30	0.01	0.14	0.08	0.02	0.22	0.09	1.20	0.80
22	0.80	0.40	1.00	0.20	1.60	0.60	0.03	0.18	0.05	0.04	0.46	0.16	1.50	0.10
23	1.00	0.20	8.00	0.20	2.00	0.10	0.04	0.03	0.15	0.04	0.29	0.14	1.10	0.50
24	0.59	0.50	8.00	0.30	1.70	0.50	0.03	0.05	0.25	0.02	0.35	0.11	1.70	0.20
25	0.63	0.10	2.00	0.30	1.80	0.70	0.05	0.04	0.03	0.02	0.14	0.33	0.30	0.00
26	0.75	0.30	2.00	0.50	1.80	0.20	0.04	0.08	0.10	0.05	0.03	0.43	0.70	0.60
27	0.84	0.00	8.00	0.40	1.60	0.80	0.02	0.19	0.19	0.03	0.12	0.30	0.60	0.10
28	0.91	0.40	7.00	0.40	1.90	0.30	0.02	0.13	0.19	0.04	0.19	0.49	0.10	0.70
29	0.94	0.10	2.00	0.30	1.70	0.20	0.03	0.02	0.06	0.09	0.44	0.28	1.80	0.30
30	0.70	0.50	4.00	0.40	1.90	0.90	0.02	0.11	0.03	0.08	0.31	0.34	1.70	0.60
31	0.66	0.10	7.00	0.30	2.00	0.40	0.04	0.16	0.23	0.10	0.41	0.27	1.50	0.10
32	0.88	0.30	9.00	0.40	1.70	0.60	0.05	0.14	0.17	0.06	0.42	0.39	1.30	0.50
33	0.50	0.30	6.00	0.30	1.60	0.50	0.03	0.11	0.13	0.06	0.26	0.26	1.00	0.50
34	0.28	0.50	7.00	0.40	1.90	0.20	0.02	0.11	0.02	0.04	0.23	0.04	1.60	0.40
35	0.05	0.10	9.00	0.30	1.70	0.70	0.03	0.06	0.08	0.02	0.12	0.26	1.50	0.70
36	0.11	0.30	1.00	0.40	1.70	0.10	0.04	0.11	0.15	0.05	0.11	0.07	1.10	0.50
37	0.36	0.10	4.00	0.30	1.90	0.50	0.04	0.15	0.22	0.01	0.06	0.19	1.80	0.80
38	0.08	0.30	8.00	0.50	1.90	0.80	0.04	0.08	0.10	0.06	0.47	0.09	0.70	0.40
39	0.47	0.00	8.00	0.30	1.90	0.30	0.04	0.04	0.04	0.09	0.30	0.12	0.20	0.90
40	0.23	0.40	5.00	0.50	1.80	0.60	0.01	0.12	0.21	0.06	0.33	0.06	0.10	0.30
41	0.19	0.10	2.00	0.40	1.70	0.10	0.02	0.20	0.19	0.07	0.49	0.19	0.60	1.00
42	0.31	0.50	10.00	0.20	1.60	0.40	0.03	0.18	0.06	0.07	0.09	0.31	1.30	0.80
43	0.03	0.20	6.00	0.20	2.00	0.60	0.01	0.13	0.09	0.10	0.17	0.48	1.20	0.20
44	0.48	0.50	1.00	0.30	1.80	0.50	0.04	0.07	0.25	0.08	0.15	0.41	1.60	1.00
45	0.02	0.20	4.00	0.10	1.80	0.80	0.04	0.05	0.18	0.07	0.24	0.38	1.10	0.40
46	0.45	0.40	7.00	0.20	1.60	0.50	0.04	0.15	0.02	0.01	0.43	0.48	0.00	0.80
47	0.22	0.20	6.00	0.10	1.80	0.00	0.05	0.20	0.13	0.05	0.38	0.35	1.00	0.30
48	0.42	0.30	3.00	0.10	1.60	0.70	0.03	0.02	0.22	0.03	0.50	0.29	0.10	0.70
49	0.33	0.20	5.00	0.20	1.90	0.00	0.01	0.09	0.14	0.03	0.32	0.45	0.60	0.00
50	0.14	0.30	6.00	0.50	1.40	0.00	0.02	0.02	0.11	0.05	0.35	0.36	1.20	0.40
51	0.44	0.10	8.00	0.40	1.50	0.50	0.02	0.05	0.16	0.03	0.45	0.50	2.00	0.90
52	0.27	0.30	5.00	0.40	1.30	0.10	0.05	0.12	0.12	0.03	0.26	0.46	1.60	0.10
53	0.39	0.10	2.00	0.50	1.50	0.70	0.03	0.17	0.06	0.02	0.48	0.29	1.70	0.80

54	0.17	0.40	6.00	0.50	1.10	0.60	0.05	0.07	0.18	0.09	0.29	0.42	0.80	0.20
55	0.20	0.10	10.00	0.40	1.50	0.30	0.03	0.03	0.21	0.07	0.05	0.35	0.50	0.90
56	0.00	0.30	3.00	0.40	1.10	0.80	0.02	0.18	0.12	0.07	0.22	0.37	0.90	0.50
57	0.41	0.00	3.00	0.40	1.40	0.40	0.03	0.16	0.01	0.09	0.16	0.40	0.30	0.80
58	0.38	0.40	9.00	0.30	1.30	0.20	0.01	0.17	0.23	0.09	0.37	0.18	1.80	1.00
59	0.25	0.20	9.00	0.10	1.30	0.70	0.02	0.13	0.16	0.06	0.48	0.08	1.30	0.40
60	0.16	0.50	3.00	0.20	1.50	0.10	0.04	0.02	0.07	0.08	0.39	0.21	1.40	0.90
61	0.09	0.10	4.00	0.20	1.20	0.60	0.05	0.08	0.07	0.07	0.32	0.02	1.90	0.30
62	0.06	0.40	9.00	0.30	1.40	0.70	0.03	0.19	0.20	0.02	0.07	0.23	0.20	0.70
63	0.30	0.00	7.00	0.20	1.20	0.00	0.04	0.10	0.24	0.03	0.20	0.17	0.30	0.40
64	0.34	0.40	4.00	0.30	1.10	0.50	0.02	0.05	0.03	0.01	0.10	0.24	0.50	0.90
65	0.13	0.20	2.00	0.20	1.40	0.30	0.01	0.07	0.09	0.05	0.09	0.12	0.80	0.50

Tableau C.1 – Plan d’expériences de la configuration (1) – ajustement du modèle *probit* pour l’analyse préalable (14 facteurs)

exp.	$\mu$	$\alpha$	$\bar{b}_0$	$k$	$\bar{k}$	$\rho$	$\pi^T$	$\varepsilon$	$P_{imit}$	$P_{mut}$	$\sigma_{mutW}$	$\sigma_{mutK}$	$\phi_\pi$	$\phi_u$
1	0.18	0.00	7.00	0.30	1.30	0.70	0.03	0.04	0.15	0.06	0.47	0.10	1.30	0.80
2	0.24	0.30	6.00	0.30	1.50	0.20	0.04	0.03	0.19	0.08	0.25	0.12	0.70	0.30
3	0.22	0.10	10.00	0.30	1.40	0.80	0.03	0.02	0.12	0.08	0.44	0.24	1.00	0.30
4	0.16	0.40	9.00	0.30	1.30	0.40	0.02	0.01	0.20	0.09	0.32	0.05	0.40	0.90
5	0.23	0.20	6.00	0.20	1.30	0.10	0.03	0.03	0.10	0.02	0.42	0.32	1.20	0.70
6	0.13	0.40	6.00	0.30	1.30	0.60	0.04	0.04	0.03	0.05	0.39	0.45	0.10	0.20
7	0.19	0.10	8.00	0.20	1.40	0.30	0.03	0.01	0.09	0.04	0.45	0.48	1.50	0.10
8	0.20	0.30	10.00	0.30	1.50	0.80	0.01	0.02	0.07	0.01	0.32	0.36	0.10	0.50
9	0.17	0.00	5.00	0.40	1.50	0.50	0.01	0.03	0.07	0.09	0.20	0.17	0.50	0.50
10	0.24	0.30	7.00	0.40	1.20	0.30	0.03	0.03	0.01	0.07	0.03	0.22	1.70	0.00
11	0.13	0.00	10.00	0.40	1.40	0.40	0.04	0.01	0.05	0.07	0.10	0.12	0.10	0.20
12	0.25	0.20	8.00	0.50	1.30	0.10	0.04	0.02	0.08	0.06	0.13	0.23	1.20	0.90
13	0.14	0.10	7.00	0.40	1.50	0.40	0.02	0.04	0.19	0.02	0.03	0.49	0.30	0.60
14	0.20	0.20	7.00	0.50	1.40	0.90	0.01	0.03	0.11	0.03	0.16	0.26	1.30	0.40
15	0.14	0.10	9.00	0.50	1.60	0.20	0.05	0.01	0.17	0.01	0.22	0.48	0.60	0.60
16	0.17	0.20	8.00	0.40	1.30	0.90	0.03	0.02	0.16	0.04	0.06	0.35	2.00	0.80
17	0.21	0.20	7.00	0.20	1.70	0.90	0.05	0.03	0.12	0.04	0.15	0.21	1.30	0.70
18	0.14	0.30	6.00	0.30	1.70	0.40	0.04	0.02	0.15	0.02	0.01	0.01	0.20	0.40
19	0.18	0.20	8.00	0.30	1.80	0.80	0.03	0.03	0.16	0.05	0.05	0.11	1.80	0.00
20	0.15	0.30	9.00	0.20	1.60	0.20	0.02	0.03	0.18	0.01	0.22	0.09	0.50	0.50
21	0.21	0.10	7.00	0.20	2.00	0.30	0.04	0.02	0.03	0.05	0.09	0.31	1.60	1.00
22	0.20	0.30	5.00	0.20	1.60	0.60	0.05	0.02	0.08	0.09	0.16	0.37	0.30	0.40
23	0.25	0.20	9.00	0.30	2.00	0.10	0.02	0.03	0.07	0.06	0.14	0.29	1.10	0.20
24	0.15	0.40	9.00	0.30	1.80	0.50	0.02	0.04	0.02	0.07	0.11	0.43	0.40	0.90
25	0.16	0.10	5.00	0.40	1.90	0.70	0.02	0.01	0.04	0.03	0.33	0.07	0.00	0.90
26	0.19	0.30	6.00	0.50	1.80	0.20	0.02	0.02	0.10	0.01	0.43	0.18	1.10	0.00
27	0.21	0.00	9.00	0.40	1.60	0.80	0.05	0.03	0.06	0.03	0.30	0.16	0.20	0.40
28	0.23	0.30	8.00	0.40	1.90	0.30	0.04	0.03	0.08	0.04	0.49	0.04	1.40	0.70
29	0.23	0.10	6.00	0.40	1.70	0.20	0.01	0.02	0.17	0.09	0.28	0.45	0.60	0.70
30	0.18	0.40	7.00	0.40	1.90	0.90	0.03	0.01	0.16	0.06	0.34	0.42	1.20	0.30
31	0.16	0.10	9.00	0.40	2.00	0.40	0.04	0.04	0.19	0.08	0.27	0.38	0.20	0.10
32	0.22	0.30	10.00	0.50	1.80	0.60	0.04	0.03	0.13	0.08	0.39	0.32	1.10	0.80
33	0.13	0.20	8.00	0.40	1.60	0.50	0.03	0.03	0.11	0.06	0.26	0.26	1.00	0.50
34	0.07	0.40	8.00	0.40	1.90	0.20	0.03	0.01	0.06	0.05	0.04	0.41	0.80	0.20
35	0.01	0.10	9.00	0.40	1.70	0.70	0.02	0.02	0.02	0.03	0.26	0.39	1.30	0.70
36	0.03	0.30	5.00	0.40	1.80	0.10	0.03	0.03	0.09	0.03	0.07	0.27	1.00	0.70
37	0.09	0.00	6.00	0.40	2.00	0.50	0.04	0.04	0.01	0.02	0.19	0.46	1.60	0.10
38	0.02	0.20	9.00	0.50	1.90	0.80	0.03	0.02	0.11	0.09	0.09	0.19	0.80	0.30
39	0.12	0.00	9.00	0.40	1.90	0.30	0.02	0.01	0.18	0.06	0.12	0.06	1.90	0.80

40	0.06	0.30	7.00	0.50	1.80	0.60	0.03	0.04	0.12	0.07	0.06	0.03	0.50	0.90
41	0.05	0.10	5.00	0.40	1.70	0.10	0.05	0.03	0.14	0.10	0.19	0.15	1.90	0.50
42	0.08	0.40	10.00	0.30	1.70	0.40	0.05	0.02	0.14	0.02	0.31	0.34	1.50	0.50
43	0.01	0.10	8.00	0.30	2.00	0.60	0.04	0.02	0.20	0.04	0.48	0.29	0.30	1.00
44	0.12	0.40	5.00	0.30	1.80	0.50	0.02	0.04	0.16	0.04	0.41	0.39	1.90	0.80
45	0.00	0.20	7.00	0.20	1.90	0.80	0.02	0.03	0.13	0.05	0.38	0.28	0.80	0.10
46	0.11	0.30	8.00	0.30	1.70	0.50	0.04	0.01	0.02	0.09	0.48	0.02	1.70	0.40
47	0.05	0.20	8.00	0.20	1.80	0.00	0.05	0.02	0.10	0.08	0.35	0.25	0.70	0.60
48	0.11	0.30	6.00	0.20	1.70	0.70	0.01	0.04	0.04	0.10	0.29	0.03	1.40	0.40
49	0.08	0.20	7.00	0.30	1.90	0.00	0.03	0.03	0.05	0.07	0.45	0.16	0.00	0.20
50	0.04	0.20	8.00	0.50	1.50	0.00	0.01	0.02	0.09	0.07	0.36	0.30	0.70	0.30
51	0.11	0.10	9.00	0.40	1.50	0.50	0.02	0.03	0.06	0.09	0.50	0.50	1.80	0.60
52	0.07	0.20	7.00	0.40	1.40	0.10	0.03	0.02	0.05	0.06	0.46	0.40	0.30	1.00
53	0.10	0.10	6.00	0.50	1.60	0.70	0.04	0.02	0.03	0.10	0.29	0.42	1.50	0.50
54	0.04	0.30	8.00	0.50	1.20	0.60	0.02	0.03	0.18	0.06	0.42	0.20	0.40	0.00
55	0.05	0.10	10.00	0.50	1.60	0.30	0.01	0.03	0.13	0.02	0.35	0.14	1.70	0.60
56	0.00	0.20	6.00	0.40	1.20	0.80	0.05	0.02	0.14	0.05	0.37	0.22	0.90	0.80
57	0.10	0.00	6.00	0.40	1.50	0.40	0.04	0.01	0.19	0.04	0.40	0.08	1.60	0.10
58	0.09	0.30	10.00	0.30	1.40	0.20	0.04	0.04	0.17	0.08	0.18	0.44	2.00	0.10
59	0.06	0.20	9.00	0.20	1.40	0.70	0.04	0.03	0.11	0.10	0.08	0.33	0.90	1.00
60	0.04	0.40	6.00	0.30	1.60	0.10	0.01	0.02	0.15	0.08	0.21	0.35	1.80	0.60
61	0.02	0.10	7.00	0.30	1.30	0.60	0.02	0.02	0.13	0.07	0.02	0.47	0.60	0.30
62	0.02	0.30	9.00	0.30	1.50	0.70	0.05	0.03	0.04	0.02	0.23	0.06	1.40	0.30
63	0.07	0.00	8.00	0.30	1.30	0.00	0.03	0.04	0.05	0.05	0.17	0.09	0.80	0.80
64	0.09	0.40	6.00	0.30	1.20	0.50	0.02	0.01	0.02	0.03	0.24	0.13	1.80	0.90
65	0.03	0.10	5.00	0.20	1.40	0.30	0.02	0.02	0.08	0.03	0.12	0.19	0.90	0.20

Tableau C.2 – Plan d’expériences de la configuration (2) – analyse de sensibilité (14 facteurs)

exp.	$\alpha$	$\rho$	$\pi^T$	$\sigma_{mut}$	$\phi_\pi$	$\phi_u$	$\xi/\chi$
1	1	0.9	0.33	0.18	0.50	0.90	0.029/0.6
2	0	0.45	0.36	0.25	0.00	0.30	0.032/0.6
3	0	0.45	0.07	0.14	1.30	0.80	0.05/0.9
4	0	0.45	0.16	0.40	1.10	0.10	0.038/0.7
5	2	0.9	0.20	0.09	0.60	0.00	0.041/0.8
6	2	0.45	0.18	0.33	0.10	0.80	0.044/0.8
7	1	0	0.40	0.16	1.80	0.40	0.047/0.9
8	1	0.9	0.31	0.38	1.60	0.60	0.035/0.7
9	1	0.45	0.23	0.23	1.00	0.50	0.026/0.5
10	1	0	0.12	0.27	1.50	0.10	0.022/0.5
11	2	0.9	0.09	0.20	2.00	0.70	0.019/0.4
12	2	0.45	0.38	0.31	0.80	0.20	0.001/0.1
13	2	0.45	0.29	0.05	0.90	0.90	0.013/0.3
14	1	0	0.25	0.36	1.40	1.00	0.01/0.3
15	0	0.45	0.27	0.12	1.90	0.30	0.007/0.2
16	1	0.9	0.05	0.29	0.30	0.60	0.004/0.2
17	1	0	0.14	0.07	0.40	0.40	0.016/0.4

Tableau C.3 – Plan d’expériences de la configuration (3) – (7 facteurs).

La dernière colonne n’est pas utilisée pour les scenarii 1 ( $\chi = 1$  et  $\sigma_\xi = 0$ ) et 5 ( $\chi = 0$  et  $\sigma_\xi = 0$ ). Les valeurs de  $\sigma_\xi$  sont utilisées dans les scenarii 2 et 3 et les valeurs de  $\chi$  dans le scenario 4.

## II Probabilités estimées de viabilité de l'économie (modèle *probit*, configuration (1))

$\mu$	$\varepsilon = 0.1$		$\varepsilon = 0.025$	
	$b_0 = 5$	$b_0 = 7.5$	$b_0 = 5$	$b_0 = 7.5$
0.00	0.80	0.89	0.94	0.97
0.10	0.77	0.88	0.93	0.96
0.20	0.73	0.84	0.91	0.95
<b>0.25</b>	0.71	0.83	0.90	<b>0.95</b>
0.3	0.69	0.81	0.89	0.94
0.40	0.64	0.78	0.87	0.93
0.50	0.59	0.77	0.84	0.91
0.75	0.46	0.62	0.76	0.86
1.00	0.33	0.49	0.65	0.82

$\alpha$	$\varepsilon = 0.1$				$\varepsilon = 0.025$			
	$b_0 = 5$		$b_0 = 7.5$		$b_0 = 5$		$b_0 = 7.5$	
	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
0.00	0.83	0.69	0.90	0.81	0.95	0.89	0.97	0.94
0.10	0.80	0.65	0.89	0.78	0.94	0.88	0.97	0.93
0.20	0.78	0.61	0.87	0.75	0.93	0.86	0.96	0.92
0.30	0.75	0.57	0.85	0.72	0.92	0.83	0.96	0.91
<b>0.40</b>	0.71	0.53	0.83	0.69	0.90	0.81	<b>0.95</b>	0.89
0.50	0.68	0.49	0.80	0.65	0.89	0.78	0.94	0.87
$k$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
0.10	0.64	0.45	0.78	0.62	0.87	0.75	0.93	0.86
<b>0.20</b>	0.70	0.52	0.82	0.68	0.90	0.80	<b>0.95</b>	0.89
0.30	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	0.96	0.91
0.40	0.81	0.65	0.89	0.79	0.94	0.88	0.97	0.93
0.50	0.85	0.72	0.92	0.83	0.95	0.90	0.98	0.95
$k$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
1.10	0.67	0.48	0.80	0.65	0.89	0.78	0.94	0.87
1.20	0.69	0.51	0.82	0.67	0.90	0.79	0.94	0.88
<b>1.30</b>	0.71	0.53	0.83	0.69	0.90	0.81	<b>0.95</b>	0.89
1.40	0.73	0.55	0.84	0.71	0.91	0.82	0.95	0.90
1.60	0.77	0.60	0.87	0.75	0.93	0.85	0.96	0.92
1.80	0.80	0.64	0.89	0.78	0.94	0.87	0.97	0.93
2.00	0.83	0.69	0.90	0.81	0.95	0.89	0.97	0.94
$\pi^T$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
0.00	0.69	0.50	0.81	0.66	0.89	0.79	0.94	0.88
<b>0.01</b>	0.72	0.53	0.83	0.69	0.90	0.81	<b>0.95</b>	0.89
0.02	0.75	0.57	0.85	0.72	0.92	0.83	0.96	0.91
0.03	0.77	0.61	0.87	0.75	0.93	0.85	0.96	0.92
0.04	0.80	0.64	0.89	0.78	0.94	0.87	0.97	0.93
0.05	0.82	0.67	0.90	0.80	0.95	0.89	0.97	0.94
$\rho$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$

	$\varepsilon = 0.1$				$\varepsilon = 0.025$			
	$b_0 = 5$		$b_0 = 7.5$		$b_0 = 5$		$b_0 = 7.5$	
<b>0.00</b>	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	<b>0.96</b>	0.91
0.40	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	0.96	0.91
<b>0.90</b>	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	<b>0.96</b>	0.91
$P_{init}$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
0.01	0.91	0.82	0.95	0.90	0.97	0.94	0.99	0.97
0.05	0.87	0.76	0.93	0.86	0.96	0.92	0.98	0.96
0.10	0.81	0.66	0.89	0.79	0.94	0.88	0.97	0.93
0.15	0.72	0.54	0.84	0.70	0.91	0.82	0.95	0.90
<b>0.16</b>	0.70	0.52	0.82	0.68	0.90	0.80	<b>0.95</b>	0.89
0.17	0.68	0.50	0.81	0.66	0.89	0.79	0.94	0.88
0.18	0.66	0.47	0.79	0.64	0.88	0.77	0.94	0.87
0.19	0.64	0.45	0.78	0.61	0.87	0.75	0.93	0.86
<b>0.20</b>	0.62	0.42	0.76	0.59	0.86	0.74	<b>0.92</b>	0.84
0.25	0.50	0.31	0.66	0.47	0.79	0.63	0.88	0.77
$P_{mut}$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
<b>0.01</b>	0.66	0.47	0.79	0.63	0.88	0.77	<b>0.93</b>	0.87
<b>0.03</b>	0.71	0.52	0.83	0.68	0.90	0.80	<b>0.95</b>	0.89
0.05	0.75	0.58	0.85	0.73	0.92	0.84	0.96	0.91
0.10	0.84	0.70	0.91	0.82	0.95	0.90	0.97	0.95
$\sigma_{mutK}$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
<b>0.01</b>	0.79	0.62	0.88	0.77	0.93	0.86	<b>0.96</b>	0.92
0.25	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	0.96	0.91
<b>0.50</b>	0.73	0.54	0.84	0.70	0.91	0.82	<b>0.96</b>	0.90
$\sigma_{mutW}$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
<b>0.01</b>	0.74	0.56	0.85	0.71	0.91	0.83	<b>0.96</b>	0.90
0.25	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	0.96	0.91
<b>0.50</b>	0.78	0.62	0.88	0.76	0.93	0.86	<b>0.96</b>	0.92
$\phi_\pi$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
<b>0.00</b>	0.56	0.37	0.72	0.53	0.83	0.69	<b>0.90</b>	0.81
0.50	0.67	0.48	0.80	0.64	0.88	0.77	0.94	0.87
<b>0.70</b>	0.71	0.52	0.83	0.68	0.90	0.80	<b>0.95</b>	0.89
1.00	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	0.96	0.91
1.50	0.83	0.69	0.91	0.81	0.95	0.89	0.97	0.94
2.00	0.89	0.78	0.94	0.87	0.97	0.93	0.98	0.96
$\phi_u$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.125$	$\mu = 0.5$
0.00	0.91	0.82	0.95	0.90	0.97	0.94	0.99	0.97
0.50	0.76	0.59	0.86	0.74	0.92	0.84	0.96	0.91
<b>0.60</b>	0.72	0.53	0.83	0.69	0.90	0.81	<b>0.95</b>	0.89
<b>1.00</b>	0.51	0.32	0.67	0.48	0.79	0.64	<b>0.88</b>	0.77

Tableau C.5 – Probabilités estimées de viabilité de l'économie en fonction des valeurs des paramètres  $\mu$ ,  $\varepsilon$  et  $\bar{b}_0$ , les autres paramètres étant fixés au milieu de leur domaine de variation de la configuration (1)

### III Rapports des modèles de krigage (analyse de sensibilité, configuration (2))

Pour aider à l'interprétation des rapports de modèle de krigage, rappelons les équations du modèle de krigage explicitées dans l'annexe II du chapitre précédent. Les simulations étant non-déterministes, le modèle de krigage est appliqué sur la moyenne de chaque variable-réponse à travers les réplications de chaque expérience (Sacks et al. (1989)). Nous avons alors 65 observations ( $n = 65$ ) et 14 facteurs ou paramètres ( $k = 14$ ). Le métamodèle  $Y(x)$  de la réponse  $y(x)$  est obtenu par une combinaison linéaire des 65 observations de  $y$ , notées  $(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_{65})$  dans le plan, i.e.  $(y(\mathbf{x}_1), \dots, y(\mathbf{x}_{65}))$ . On pose  $\forall x \in D \in \mathbb{R}^{14}$  :

$$Y(x) = \mu(x) + Z(x) \quad (\text{C.1})$$

avec  $\mu : x \in D \in \mathbb{R}^{14} \rightarrow \mu(x) \in R$  une fonction de tendance et  $Z$  un processus aléatoire centré de matrice de variances-covariances  $C : (u, v) \in D^2 \rightarrow C(u, v) \in R$ . Le processus de covariance est supposé stationnaire d'ordre deux, i.e. les moyennes et les variances, notées  $\mu_Y$  et  $\sigma_Y^2$  sont constantes et les covariances des réponses dépendent seulement (et négativement) de la distance entre les points du domaine correspondants *via* la fonction suivante :

$$\text{cov}[Y(x_i), Y(x_j)] = \sigma_Y^2 \prod_{g=1}^{14} \exp(-\theta_g(x_{g,i} - x_{g,j})^2) \quad (\text{C.2})$$

Nous estimons un modèle de kriging ordinaire, i.e. la tendance  $\mu(x)$  est posée comme une constante à estimer. Ainsi, les rapports des modèles qui suivent C.1, à C.4 donnent la moyenne estimée **Mu** du métamodèle (i.e.  $\bar{\mu}$  dans l'équation (C.1)), la variance estimée (**Sigma**) du processus de covariance (paramètre  $\sigma_Y^2$  dans la sous-section II.2.4 en annexe B) ainsi qu'un tableau d'analyse de la variance de la fonction de covariance estimée. Le paramètre **Thêta** (seconde colonne) indique l'importance relative de chaque facteur dans la fonction de corrélation des réponses : il correspond au paramètre  $\theta_g$  de la fonction (B.8),  $g = \{1, \dots, 14\}$  étant le nombre de paramètres. Les paramètres pour lesquels  $\theta_g > 0$  influencent la variable-réponse et sont listés dans la première colonne. L'effet principal  $m(x_g)$  (quatrième colonne) est la contribution à la variance d'un facteur seul (cf. équation (B.13)). Les effets d'interaction deux à deux  $m(x_g, x_h)$  sont listés dans les autres colonnes (à partir de la cinquième, cf. équation (B.14)). En agrégeant l'effet principal et tous les termes d'interactions deux à deux, on obtient la sensibilité totale de chaque facteur  $M(x_g)$  (i.e. la contribution totale à la variance de chaque facteur, troisième colonne). Les paramètres non-influents (i.e. pour lesquels  $\theta_g = 0$ ) ou avec une sensibilité totale négligeable (typiquement inférieure à 0.01) ne sont pas reportés dans les tableaux. Pour des raisons de clarté, les effets principaux inférieurs à 0.01 ne sont pas non plus représentés graphiquement. Seules les interactions importantes (typiquement supérieures à 0.05) sont illustrées, toujours dans un but de lisibilité.

Pour connaître le signe de l'effet principal des facteurs sur la variable-réponse, il faut se reporter aux graphiques des effets marginaux rapportés pour chaque facteur influent. La courbe dans ces graphiques montre l'effet marginal de chaque facteur. Si la courbe est décroissante, le facteur exerce une influence négative sur la variable-réponse et réciproquement. Les déviations de la courbe par rapport aux points observés résultent de la variabilité due à tous les autres facteurs : si un seul facteur est significativement important, les points doivent se trouver plus ou moins alignés autour de la courbe de l'effet marginal de ce facteur.

Les interactions deux à deux sont illustrées grâce à des surfaces de réponse. Il s'agit d'un graphique en trois dimensions représentant la variable-réponse en fonction des valeurs de deux facteurs qui agissent sur elle en interaction. Ce graphique représente l'effet principal de chaque facteur ainsi que leur effet en interaction sur la variable-réponse, étant donné une configuration précise de tous les autres facteurs (sauf mention contraire, les autres facteurs sont fixés au milieu de leur ensemble de

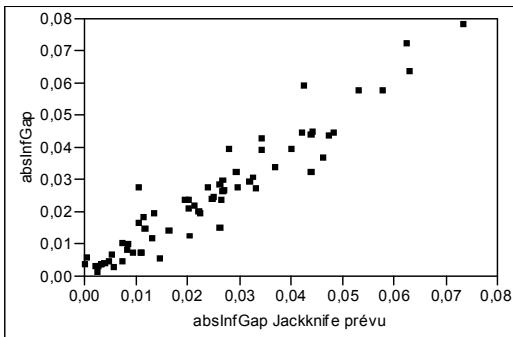
variation).

Nous avons deux indicateurs de la qualité du modèle. D'une part, le graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues permet d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle sur l'échantillon. Plus les points se trouvent près de la diagonale 45 degrés partant de l'origine, meilleur est l'ajustement sur l'échantillon. Le kriging étant un interpolateur exact, la valeur prévue à un point est obtenue par *leave-one-out*, i.e. en réestimant le modèle sans ce point. L'opération est répétée pour chacun des  $n$  points et les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs relevées. D'autre part, le chiffre  $-2\log - vraisemblance$  (abrégé  $-2\log$ , cf. équation (B.9), page 260) donne une mesure de la qualité de l'ajustement du modèle. Plus ce chiffre est faible, meilleur est l'ajustement. Par ailleurs, le paramètre de pépite est parfois introduit pour éviter une matrice de variances singulière.

Nous expliquons en détails le premier modèle (rapport C.1 ci-après) dans un but pédagogique. Tout d'abord, l'indicateur d'ajustement du modèle est très faible (-459), suggérant que le modèle est fortement significatif. Nous constatons aussi que les points du graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues sont très proches de la première diagonale, l'ajustement est donc très bon. La moyenne de l'écart d'inflation en valeur absolue dans le métamodèle vaut 2.2% pour un écart-type proche de zéro. Les quatre graphiques en deux dimensions représentent les effets marginaux de chacun des quatre facteurs dont l'influence sur l'écart d'inflation est identifiée comme significative par le modèle (à savoir *probInit*, *mutSpaceW*, *coeffInfRate* et *infTarget*). Ainsi, plus les chocs sur le comportement d'indexation *mutSpaceW* sont forts ou plus la cible d'inflation est élevée, plus l'écart d'inflation est important (second et quatrième graphiques) alors que plus le coefficient de réaction à l'inflation est élevé ou plus la probabilité d'imitation est forte, plus le taux d'inflation est proche de sa cible (premier et troisième graphiques). L'effet d'interaction entre le coefficient de réaction à l'inflation et les chocs sur  $\gamma_w$  s'avère important (0.077). Cet effet est représenté par le cinquième graphique, en trois dimensions. L'écart d'inflation augmente d'autant plus si la cible est élevée lorsque les chocs sur  $\gamma_w$  sont forts. Si ces chocs sont forts, une cible faible permet de maintenir un écart d'inflation faible. Si, au contraire, ces chocs sont faibles, une cible forte n'augmente que faiblement l'écart d'inflation.

FIGURE C.1 – Rapport du modèle de krigeage de l'écart en valeur absolue de l'inflation à sa cible sur les 14 paramètres de la configuration (2).

**Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues**



**Rapport de modèle**

	Théta	Sensibilité totale	Effet principal	Interaction							
				problimit	mutSpaceW	alpha	coeffInflRate	initWealth	epsilon	infTarget	
problimit	3,207	0,016	0,010	.	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,005	
mutSpaceW	10,199	0,404	0,301	0,001	.	0,004	0,001	0,011	0,010	0,077	
alpha	7,061	0,020	0,004	0,001	0,004	.	0,001	0,000	0,000	0,010	
coeffInflRate	0,022	0,017	0,014	0,000	0,001	0,001	.	0,000	0,000	0,001	
initWealth	0,009	0,015	0,003	0,000	0,011	0,000	0,000	.	0,000	0,001	
epsilon	253,562	0,018	0,007	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	.	0,002	
infTarget	1700,990	0,591	0,494	0,005	0,077	0,010	0,001	0,001	0,002	.	
<b>Mu</b>	<b>Sigma</b>	<b>Pépite</b>		<b>-2*Log-</b>							
0,022	0,000	0,010		-458,934							

**Graphique(s) de modèle marginal**

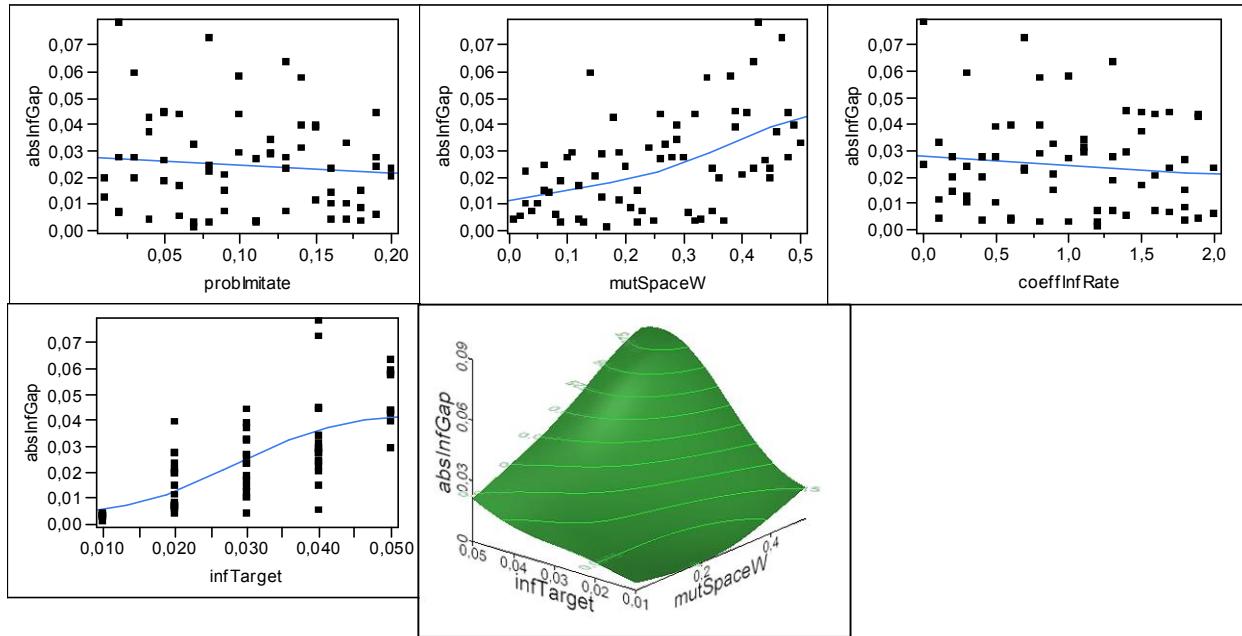
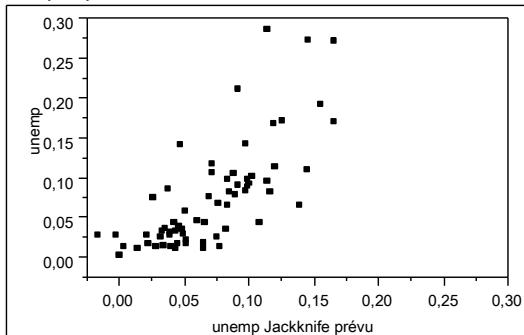


FIGURE C.2 – Rapport du modèle de krigeage du taux de chômage sur les 14 paramètres de la configuration (2).

Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues



Rapport de modèle

	Théta	Sensibilité totale	Effet principal	mut SpaceW	mut SpaceK	alpha	coeff InfRate	coeff Unemp	minCRate	epsilon	infTarget	Interaction
mutSpaceW	1,256	0,023	0,005	.	0,000	0,004	0,002	0,001	0,004	0,005	0,002	.
mutSpaceK	0,724	0,010	0,002	0,000	.	0,003	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	.
alpha	18,510	0,391	0,146	0,004	0,003	.	0,155	0,035	0,011	0,033	0,003	.
coeffInfRate	0,544	0,289	0,040	0,002	0,000	0,155	.	0,005	0,039	0,046	0,001	.
coeffUnemp	0,495	0,056	0,006	0,001	0,000	0,035	0,005	.	0,007	0,001	0,001	.
minCRate	29,903	0,181	0,099	0,004	0,000	0,011	0,039	0,007	.	0,012	0,009	.
epsilon	1842,584	0,185	0,060	0,005	0,004	0,033	0,046	0,001	0,012	.	0,025	.
infTarget	1012,821	0,184	0,142	0,002	0,000	0,003	0,001	0,001	0,009	0,025	.	.
Mu	Sigma	-2*Log-vraisemblance										
0,080	0,006	-197,536										

Graphique(s) de modèle marginal

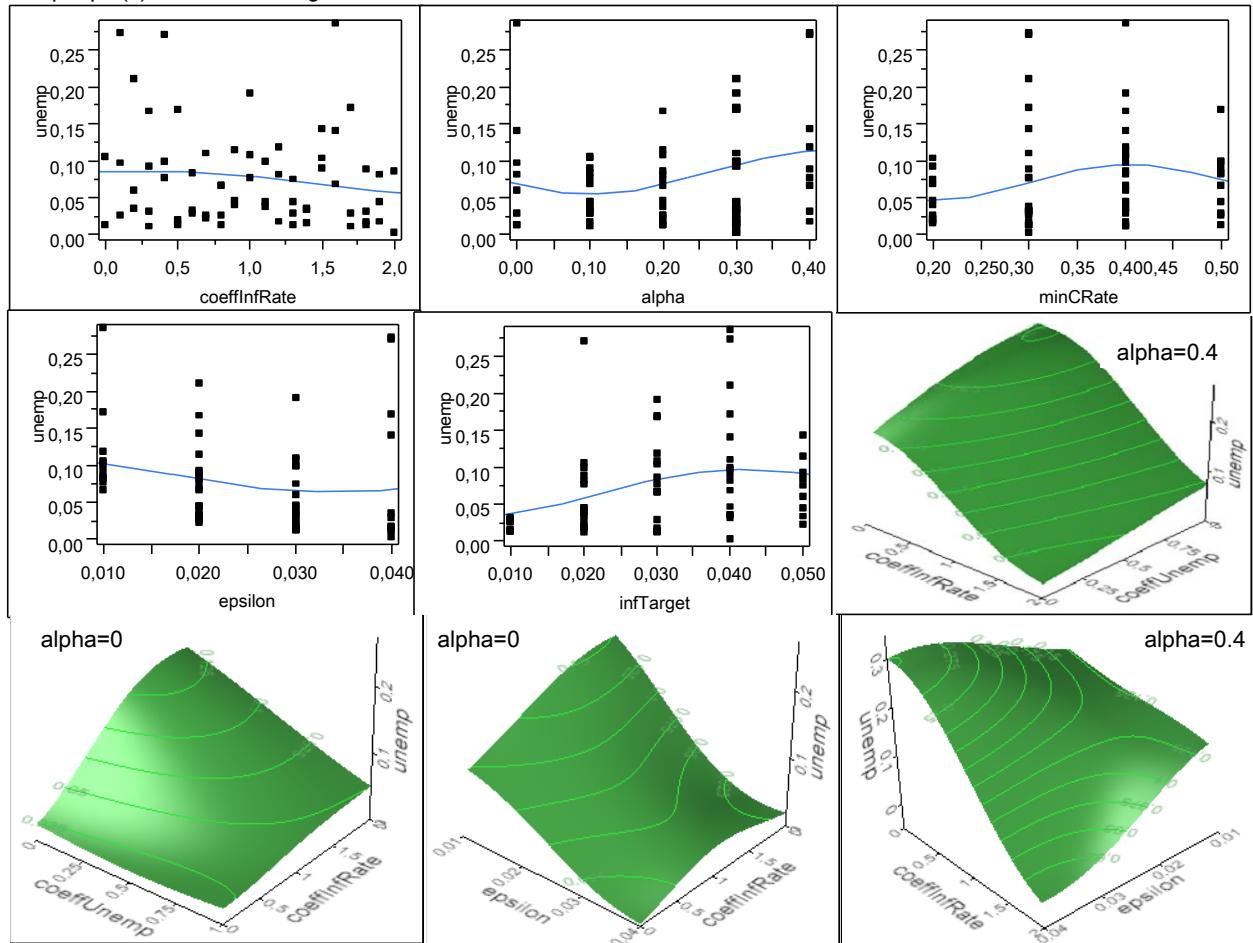
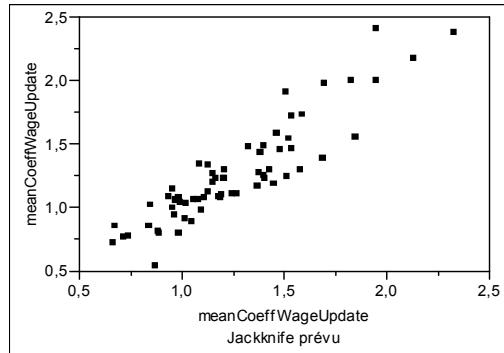


FIGURE C.3 – Rapport du modèle de krigeage du comportement moyen d’indexation du salaire nominal désiré sur la cible d’inflation (i.e. moyenne du coefficient  $\gamma_w(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ) sur les 14 paramètres de la configuration (2).

**Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues**



**Rapport de modèle**

	Theta	Sensibilité totale	Effet principal	Interaction											
				probLimit	probMut	mutSpaceW	alpha	coeffInfRate	rho	minCRate	maxCRate	epsilon	infTarget		
probLimit	16,803	0,137	0,021	.	0,004	0,102	0,002	0,005	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
probMut	25,409	0,036	0,000	0,004	.	0,029	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
mutSpaceW	26,060	0,853	0,596	0,102	0,029	.	0,011	0,024	0,043	0,008	0,011	0,023	0,007		
alpha	0,908	0,017	0,004	0,002	0,000	0,011	.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
coeffInfRate	0,098	0,033	0,002	0,005	0,001	0,024	0,000	.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
rho	0,505	0,049	0,003	0,000	0,001	0,043	0,000	0,000	.	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
minCRate	0,814	0,013	0,004	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,001	.	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
maxCRate	0,179	0,022	0,009	0,002	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	.	0,000	0,000	0,000	0,000
epsilon	214,560	0,069	0,044	0,000	0,000	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	.	0,000	0,000	0,000
infTarget	50,610	0,036	0,028	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	.
Mu	Sigma	Pépite	-2*Log-												
1,395	0,308	0,000	-5,651												

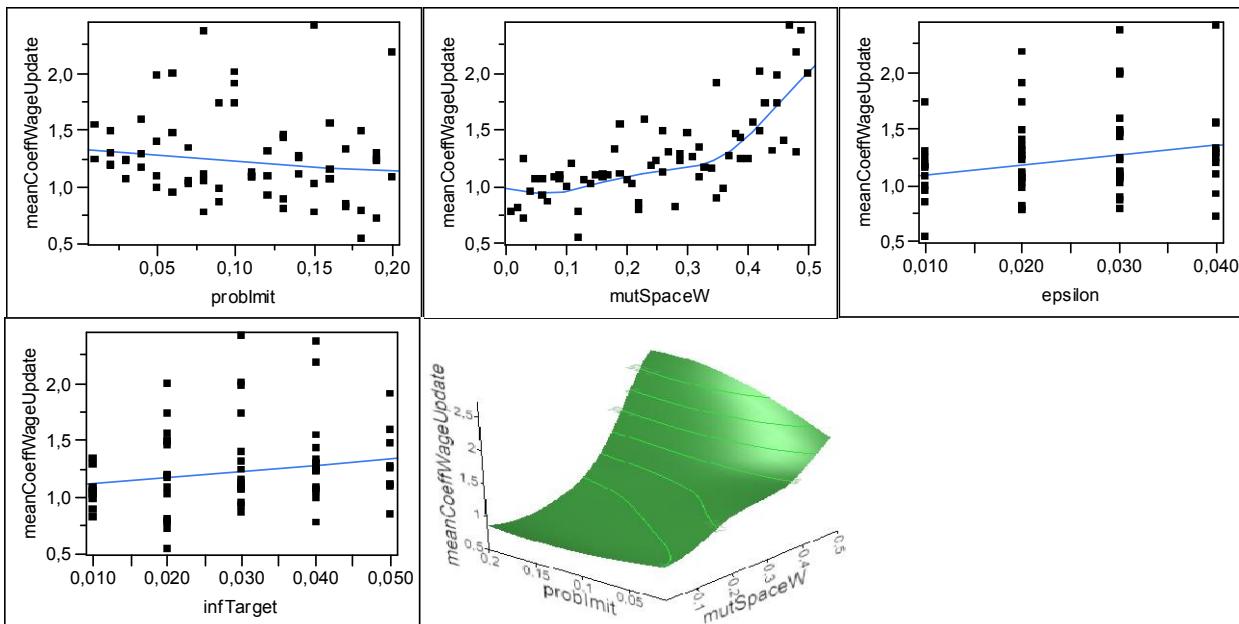
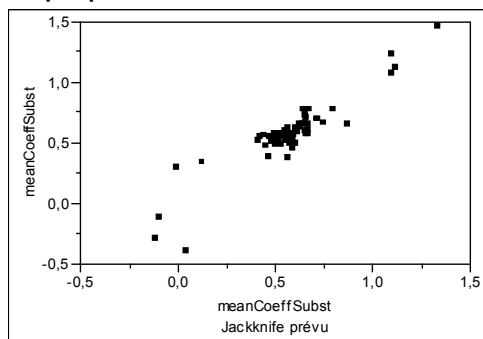


FIGURE C.4 – Rapport du modèle de krigeage du comportement moyen de réaction au taux d'intérêt réel anticipé (i.e. moyenne du coefficient  $\gamma_k(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ) sur les 14 paramètres de la configuration (2).

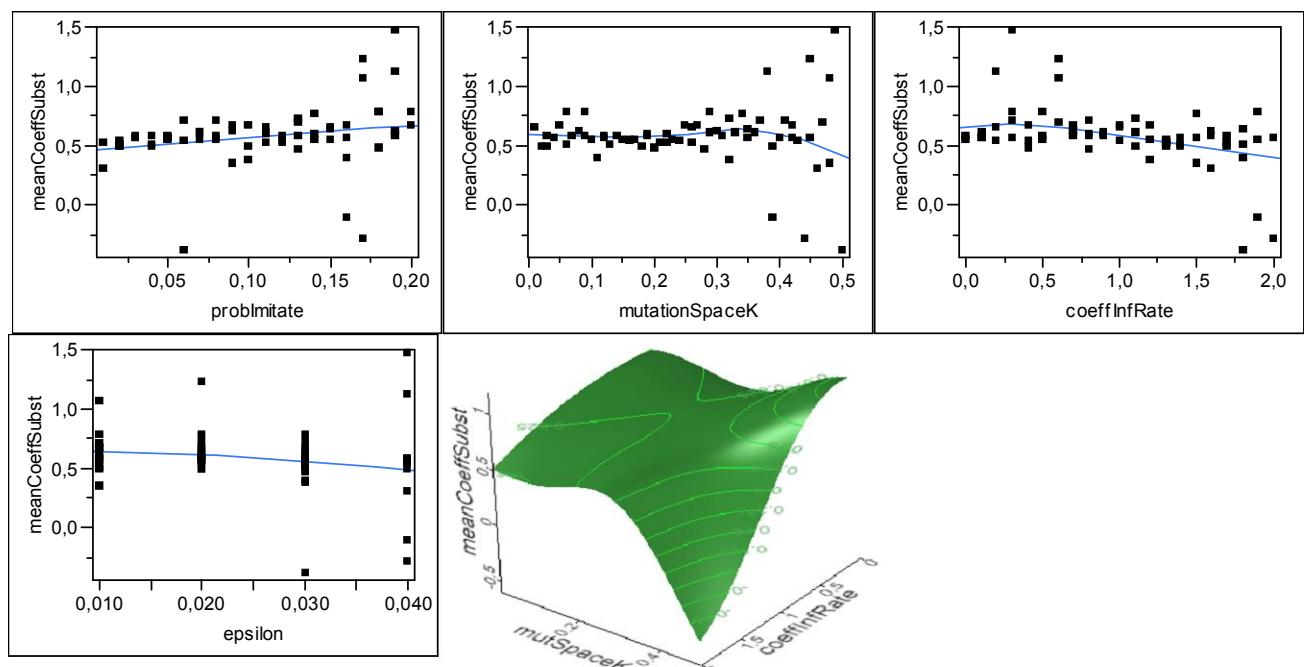
**Graphique des valeurs observées en fonction des valeurs prévues**



**Rapport de modèle**

	Théta	Sensibilité totale	Effet principal	Interaction							
				problimit	mutSpaceW	mutSpaceK	mu	coeffInflRate	coeffUnemp	minCRate	epsilon
problimit	13,437	0,146	0,072		0,000	0,006	0,000	0,048	0,019	0,000	0,001
mutSpaceW	0,092	0,011	0,007	0,000		0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
mutSpaceK	13,884	0,434	0,040	0,006	0,003		0,020	0,340	0,006	0,012	0,004
mu	3,544	0,046	0,007	0,000	0,000	0,020		0,019	0,000	0,000	0,000
coeffInflRate	0,489	0,654	0,174	0,048	0,000	0,340	0,019		0,007	0,000	0,066
coeffUnemp	0,182	0,036	0,004	0,019	0,000	0,006	0,000	0,007		0,000	0,000
minCRate	0,381	0,015	0,002	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000		0,000
epsilon	261,517	0,116	0,045	0,001	0,000	0,004	0,000	0,066	0,000	0,000	
Mu	Sigma	<b>-2*Log-vraisemblance</b>									
0,214	0,217	-57,218									

**Graphique(s) de modèle marginal**



## IV Résultats complémentaires (config. 3)

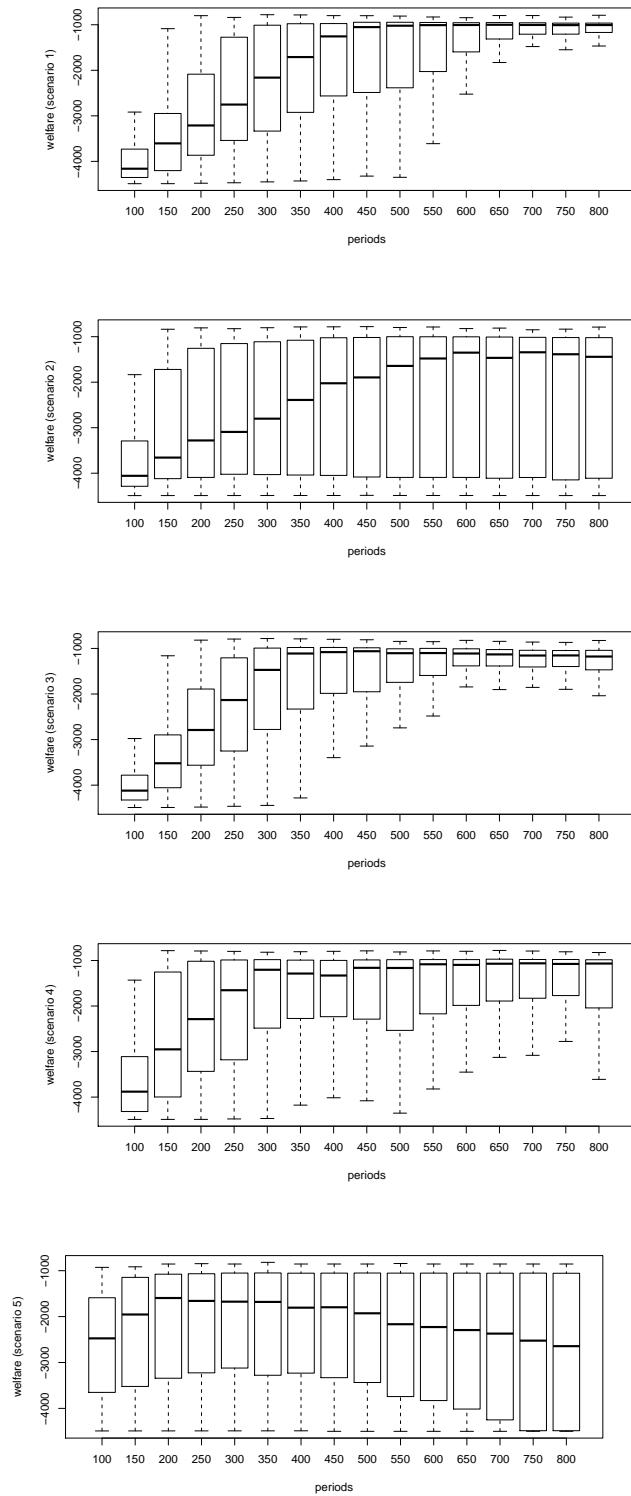


FIGURE C.5 – Evolution du bien-être agrégé dans les 5 scenarii (configuration 3)

	scenario 1	scenario 2	scenario 3	scenario 4	scenario 5
	<i>infGapSqr</i>	<i>unempSqr</i>	<i>infGapSqr</i>	<i>unempSqr</i>	<i>infGapSqr</i>
(Intercept)	1.1e-04*** (1e-03)	0.216*** (1e-12)	0.114*** (0.004)	5e-05 (0.81)	0.169*** (1e-08)
$\phi_\pi$	2.3e-04*** (4e-05)	-7e-04 (0.966)	-0.0042*** (0.007)	-0.024 (0.648)	3e-03 (0.18)
$\phi_u$	3.1e-04*** (3e-08)	0.11* (0.039)	2e-05 (0.99)	-0.129 (0.143)	0.067 (0.1)
$\phi_\pi^2$	-1.4e-04*** (4e-10)	-0.028* (0.019)	0.0014* (0.042)	-0.025 (0.22)	-8e-04 (0.186)
$\phi_u^2$	-4e-04*** (1e-14)	-0.152*** (0.003)	-3e-04 (0.631)	0.062 (0.391)	0.001* (0.041)
$\phi_\pi \phi_u$	2.6e-05 (0.388)	0.07 (0.545)	7e-04 (0.596)	0.058 (0.117)	-4e-04 (0.177)
$\rho$	3e-05* (0.017)	-0.037*** (3e-04)	-0.001*** (6e-09)	0.003 (0.843)	4e-04* (1e-07)
<i>learning</i> (medium)	-2.5e-04*** (<2e-16)	-0.152*** (2e-06)	-0.002*** (<2e-16)	-0.153*** (2e-16)	-6e-04 . (0.091)
<i>learning</i> (strong)	-2.4e-04*** (<2e-16)	-0.141*** (0.048)	-0.001* (2e-10)	-0.101*** (0.026)	-6e-04* (<2e-16)
$\sigma_{mutK}$	-6e-05 (0.161)	0.02 (0.626)	5e-04 (0.718)	0.045 (0.269)	-3e-04 (0.49)
$\sigma_{mutW}$	8e-04*** (<2e-16)	-0.0115 (0.163)	0.005*** (2e-13)	0.491*** (<2e-16)	0.001* (0.028)
$\sigma_\zeta$	NA	NA	0.049*** (<2e-16)	2.429*** (0.001)	6e-03*** (7e-04)
$\chi$	NA	NA	NA	NA	-0.014*** (<2e-16)
F-stat	61.41*** (<2e-16)	23.56*** (<2e-16)	12.28*** (<2e-16)	36.39*** (<2e-16)	2.125* (0.016)
BP-stat	3370 (<2e-16)	354 (<2e-16)	6969 (<2e-16)	821 (<2e-16)	8918 (<2e-16)
adj. $R^2$	0.199	0.181	0.146	0.133	0.048 0.188

Signif. codes : 0 '\*\*\*', 0.001 '\*\*', 0.01 '\*' 0.05 ':' 0.1 , ' 1

Tableau C.6 – Estimation par les MCO du carré de l'écart d'inflation et du taux de chômage dans chaque scénario (p-value)



ANNEXE D

**Annexes au chapitre 4**

---



## I Plans d'expériences utilisés

exp.	<i>window</i>	$\sigma_{mutK}$	$\sigma_{mutW}$	$\phi_\pi$	$\phi_u$	$P_{mut}$	$P_{imit}$	$\zeta$ (en %)
1	40.00	0.08	0.20	0.40	0.90	0.07	0.19	1.00
2	35.00	0.40	0.09	0.80	0.50	0.03	0.20	0.75
3	35.00	0.20	0.37	0.30	0.00	0.06	0.19	0.25
4	25.00	0.36	0.40	0.80	0.90	0.02	0.21	0.25
5	40.00	0.06	0.21	0.40	0.70	0.07	0.13	1.25
6	40.00	0.38	0.16	0.60	0.40	0.03	0.08	1.75
7	30.00	0.21	0.39	0.50	0.00	0.07	0.13	1.75
8	25.00	0.29	0.38	0.70	0.90	0.03	0.09	2.00
9	30.00	0.14	0.13	1.10	0.70	0.04	0.05	0.50
10	30.00	0.28	0.15	1.40	0.20	0.06	0.07	1.00
11	30.00	0.13	0.31	1.90	0.30	0.02	0.08	0.50
12	30.00	0.30	0.28	1.90	0.80	0.10	0.14	1.00
13	25.00	0.10	0.12	1.10	0.60	0.02	0.24	1.50
14	35.00	0.26	0.18	1.80	0.20	0.06	0.24	1.50
15	25.00	0.12	0.35	1.80	0.40	0.01	0.18	1.50
16	35.00	0.27	0.26	2.00	0.80	0.09	0.16	1.50
17	25.00	0.23	0.23	1.00	0.50	0.06	0.15	1.25
18	5.00	0.37	0.25	1.60	0.10	0.04	0.11	1.25
19	10.00	0.05	0.36	1.30	0.50	0.08	0.10	1.50
20	10.00	0.25	0.08	1.70	1.00	0.05	0.11	2.00
21	20.00	0.09	0.05	1.20	0.10	0.09	0.09	2.00
22	5.00	0.39	0.24	1.60	0.30	0.04	0.17	1.00
23	5.00	0.07	0.29	1.40	0.60	0.08	0.22	0.50
24	15.00	0.24	0.06	1.50	1.00	0.04	0.18	0.50
25	20.00	0.16	0.07	1.30	0.10	0.08	0.21	0.25
26	15.00	0.31	0.32	0.90	0.30	0.07	0.25	1.75
27	15.00	0.17	0.30	0.60	0.80	0.05	0.23	1.25
28	15.00	0.32	0.14	0.10	0.70	0.09	0.23	1.75
29	15.00	0.15	0.17	0.10	0.30	0.01	0.16	1.25
30	20.00	0.35	0.33	0.90	0.40	0.09	0.06	0.75
31	10.00	0.19	0.27	0.30	0.80	0.05	0.06	0.75
32	20.00	0.33	0.10	0.20	0.60	0.10	0.12	0.75
33	10.00	0.18	0.19	0.00	0.20	0.02	0.14	0.75

Tableau D.1 – Plan d'expériences de la configuration (4) – (8 facteurs).

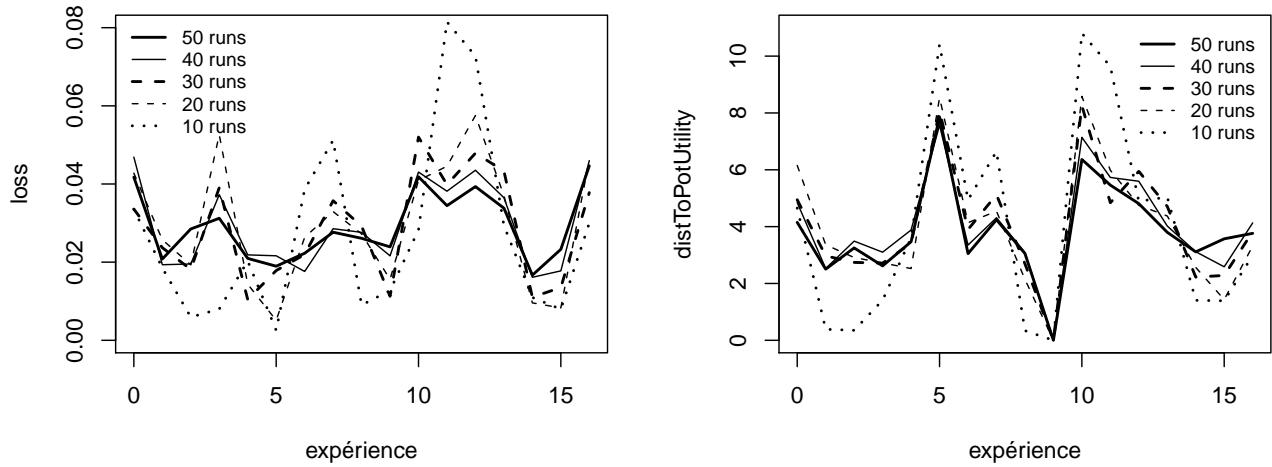


FIGURE D.1 – Variance de la fonction de perte et de la distance moyenne à l'utilité potentielle en fonction du nombre de réplications de la configuration 5.

Plan d'expériences à 2 facteurs(NOLH)			Plan de validation (aléatoire)		
exp.	$\phi_\pi$	$\phi_u$	exp.	$\phi_\pi$	$\phi_u$
0	0.60	1	0	1.73	0.38
1	0.10	0.30	1	1.25	0.87
2	0.30	0.40	2	0.27	0.62
3	0.40	0.60	3	0.75	0.13
4	1.50	0.90	4	1.96	0.65
5	2.00	0.30	5	0.04	0.35
6	1.30	0.20	6	0.71	0.98
7	1.10	0.90	7	1.29	0.02
8	1.00	0.50			
9	1.40	0.00			
10	1.90	0.80			
11	1.80	0.60			
12	1.60	0.40			
13	0.50	0.10			
14	0.00	0.70			
15	0.80	0.80			
16	0.90	0.10			

Tableau D.2 – Plan d'expériences et plan de validation du modèle de krigage de la configuration (5) – (2 facteurs).

Plan d'expériences à 5 facteurs(NOLH)					Plan de validation (aléatoire)				
exp.	$P$	$\zeta$	$\phi_\pi$	$\phi_u$	exp.	$P$	$\zeta$	$\phi_\pi$	$\phi_u$
1	0.30	0.010	0.80	0.30	1	0.67	0.001	1.33	0.44
2	0.10	0.003	1.10	0.00	2	0.89	0.004	0.22	0.11
3	0.10	0.005	0.50	0.60	3	0.33	0.002	1.78	0.56
4	0.20	0.007	2.00	0.60	4	0.56	0.005	0.44	1.00
5	0.80	0.009	0.30	0.30	5	0.78	0.008	2.00	0.22
6	1.00	0.004	1.60	0.10	6	0.44	0.006	0.00	0.67
7	0.60	0.003	0.60	0.90	7	0.00	0.003	0.67	0.00
8	0.60	0.009	1.90	0.80	8	0.11	0.009	0.89	0.33
9	0.50	0.006	1.00	0.50	9	1.00	0.01	1.11	0.89
10	0.70	0.001	1.30	0.80	10	0.22	0.007	1.56	0.78
11	0.90	0.008	0.90	1.00					
12	0.90	0.006	1.50	0.40					
13	0.80	0.004	0.00	0.40					
14	0.30	0.002	1.80	0.70					
15	0.00	0.007	0.40	0.90					
16	0.40	0.008	1.40	0.10					
17	0.40	0.002	0.10	0.20					

Tableau D.3 – Plan d'expériences et plan de validation du modèle de krigage de la configuration (6) – (4 facteurs).

## II Rôle de la fourchette (configuration 4)

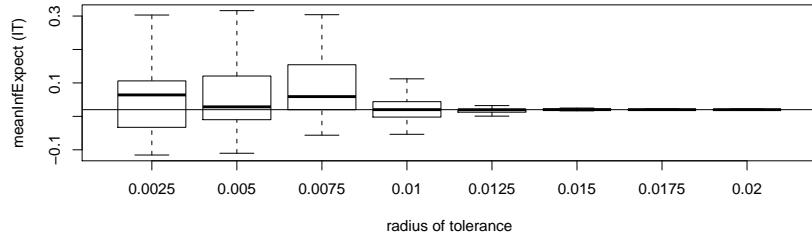


FIGURE D.2 – Moyenne des anticipations d’inflation parmi les ménages en régime de ciblage de l’inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette

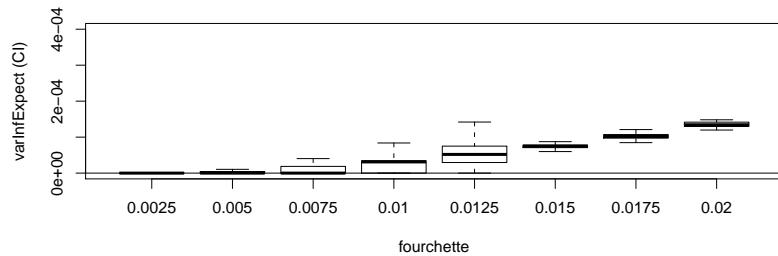


FIGURE D.3 – Variance des anticipations d’inflation parmi les ménages en régime de ciblage de l’inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette

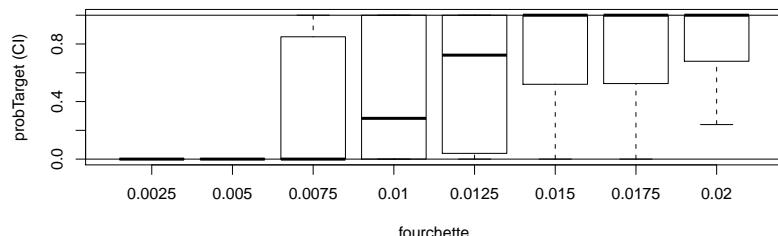


FIGURE D.4 – Crédibilité de la Banque centrale en régime de ciblage de l’inflation en fonction de la largeur de la fourchette

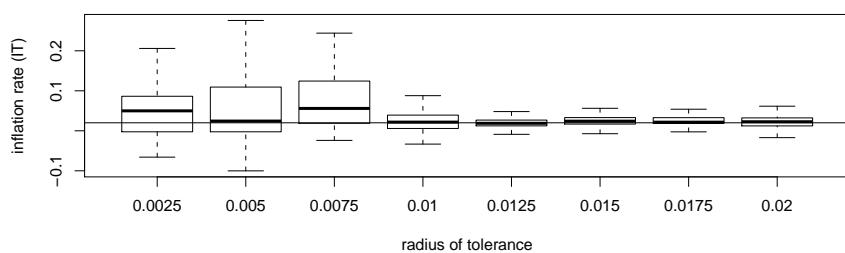


FIGURE D.5 – Taux d’inflation en régime de ciblage de l’inflation en fonction de la largeur de la fourchette

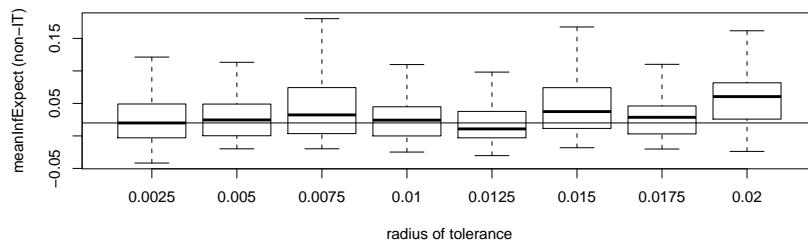


FIGURE D.6 – Moyenne des anticipations d’inflation parmi les ménages en régime de non-ciblage de l’inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette

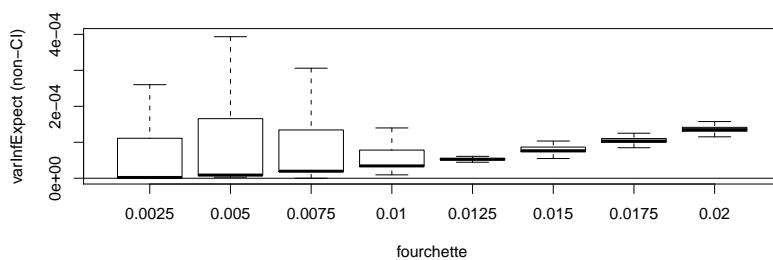


FIGURE D.7 – Variance des anticipations d’inflation parmi les ménages en régime de non-ciblage de l’inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette

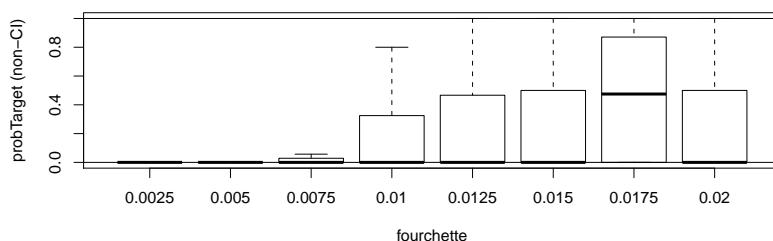


FIGURE D.8 – Crédibilité de la Banque centrale en régime de non-ciblage de l’inflation en fonction de la largeur de la fourchette

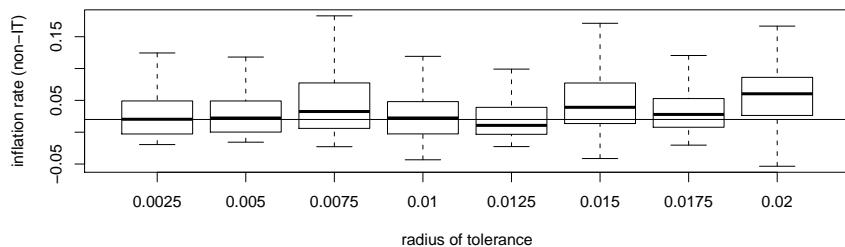
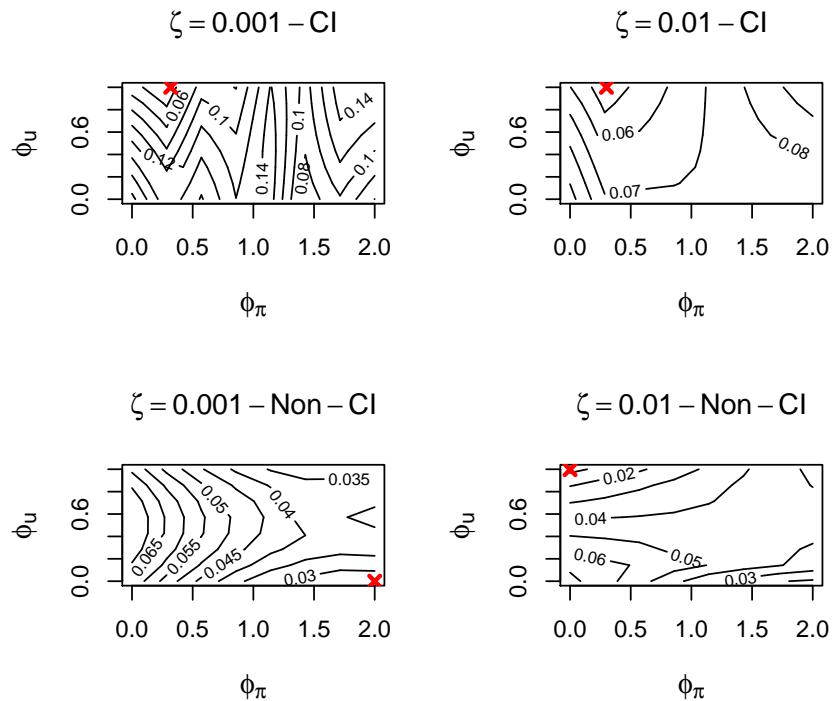


FIGURE D.9 – Taux d’inflation en régime de non-ciblage de l’inflation en fonction de la largeur de la fourchette

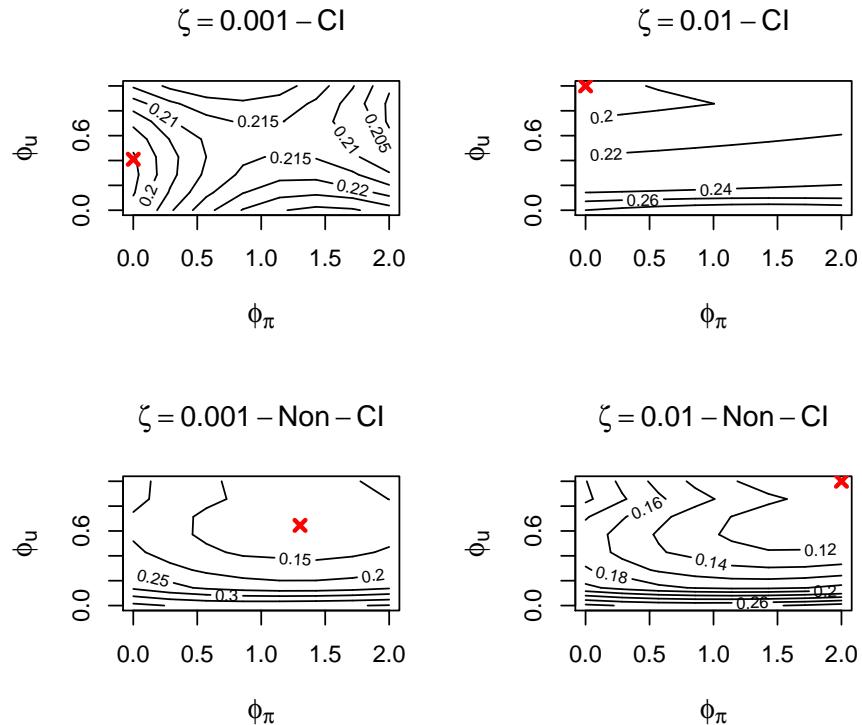
### III Résultats complémentaires (config. 5)

#### III.1 Sensibilité à la valeur de la cible d'inflation $\pi^T$



	$\zeta = 0.001 - \text{CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{CI}$	$\zeta = 0.001 - \text{Non-CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{Non-CI}$
$\phi_\pi^*$	0.31	0.3		2
$\phi_u^*$	1	1		0
$L^*$	0.0273	0.0458		0.0094
mean( $\pi^a(i)$ )	0.0533	0.0542		0.042
$P_{target}(800)$	0.007	0.2166		0.1226

FIGURE D.10 – Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la Banque centrale,  $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.4\}$  et  $\pi^T = 4\%$ .



	$\zeta = 0.001 - \text{CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{CI}$	$\zeta = 0.001 - \text{Non-CI}$	$\zeta = 0.01 - \text{Non-CI}$
$\phi_\pi^*$	0	0	1.34	2
$\phi_u^*$	0.51	1	0.62	1
$L^*$	0.1914	0.1845	0.146	0.1161
$\text{mean}(\pi^a(i))$	0.042	0.0411	0.0379	0.0223
$P_{\text{target}}(800)$	0.001	0.0478	0.0038	0.0348

FIGURE D.11 – Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la Banque centrale,  $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$  et  $\pi^T = 1\%$ .

### III.2 Rapports des modèles de krigage

$\beta_0$	$\beta_{\phi\pi}$	$\beta_{\phi_u}$	$\beta_{\phi\pi\phi_u}$	$\beta_{\phi\pi}^2$	$\beta_{\phi_u}^2$	$\theta_{\phi\pi}$	$\theta_{\phi_u}$	$\sigma_L^2$
$\{\sigma_{\text{mutW}}, \sigma_{\text{mutK}}\} = \{0.05, 0.05\}$								
IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 2\%$				RMSE : 0.033 (I) - 0.0282 (II) - 0.0283 (III) - <b>0.0249 (IV)</b>				
0.129	-0.009	-0.18	0.034	0.004	0.147	0.027	0.733	0.0006
IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : 0.029 (I) - <b>0.02 (II)</b> - 0.022 (III) - 0.023 (IV)				
0.093	0.034	-0.038				0.084	2.00	0.0007
Non-IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : 0.03 (I) - <b>0.019 (II)</b> - 0.03 (III) - 0.027 (IV)				
0.0902	-0.0242	0.0012				0.088	2.00	0.0002
Non-IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : 0.042 (I) - 0.04 (II) - <b>0.039 (III)</b> - 0.041 (IV)				
0.05	0.015	0.004	-0.006			0.048	1.47	0.0002
$\{\sigma_{\text{mutW}}, \sigma_{\text{mutK}}\} = \{0.4, 0.05\}$								
IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 2\%$				RMSE : <b>0.031 (I)</b> - 0.032 (II) - 0.032 (III) - 0.032 (IV)				
0.24						0.555	0.266	0.0008
IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : <b>0.015 (I)</b> - 0.029 (II) - 0.015 (III) - 0.021 (IV)				
0.23						2.608	0.154	0.0028
Non-IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : 0.073 (I) - 0.067 (II) - 0.066 (III) - <b>0.051 (IV)</b>				
0.332	0.085	-0.539	-0.05	0.044	0.457	4.00	0.022	0.002
Non-IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : <b>0.013 (I)</b> - 0.016 (II) - 0.014 (III) - 0.013 (IV)				
0.1607						1.667	0.821	0.001
IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 1\%$								
				RMSE : 0.06 (I) - 0.059 (II) - 0.054 (III) - <b>0.038 (IV)</b>				
0.3183	0.0631	-0.1242	-0.0949	-0.0039	0.2268	0.012	0.7110	0.0005
IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 1\%$								
				RMSE : 0.042 (I) - 0.034 (II) - <b>0.024 (III)</b> - 0.048 (IV)				
0.2620	0.0239	0.0830	-0.0961			0.012	1.322	0.0014
Non-IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 1\%$								
				RMSE : 0.066 (I) - <b>0.017 (II)</b> - 0.052 (III) - 0.04 (IV)				
0.2261	-0.0018	-0.1033				4.00	0.05	0.0027
Non-IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 1\%$								
				RMSE : 0.058 (I) - 0.04 (II) - 0.045 (III) - <b>0.033 (IV)</b>				
0.275	-0.005	-0.523	-0.045	0.017	0.456	1.847	0.046	0.0023
$\{\sigma_{\text{mutW}}, \sigma_{\text{mutK}}\} = \{0.05, 0.4\}$								
IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 2\%$				RMSE : 0.03 (I) - <b>0.029 (II)</b> - 0.035 (III) - 0.034 (IV)				
0.1191	0.0063	-0.0027				0.1441	0.3744	0.0006
IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
				RMSE : 0.0289 (I) - <b>0.023 (II)</b> - 0.023 (III) - 0.024 (IV)				

0.0932	0.0428	-0.0246				0.2002	1.2596	0.0014
Non-IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
RMSE : 0.026 (I) - <b>0.024 (II)</b> - 0.028 (III) - 0.033 (IV)								
0.0856	-0.0094	0.0014				2.0340	0.1409	0.0008
Non-IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 2\%$								
RMSE : 0.028 (I) - 0.027 (II) - 0.027 (III) - <b>0.023 (IV)</b>								
0.0223	0.0044	0.1637	0.0218	-0.1176	-0.0483	0.0024	0.2587	0.0004
IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 4\%$								
RMSE : 0.037 (I) - <b>0.036 (II)</b> - 0.039 (III) - 0.04 (IV)								
0.17	0.006	-0.033				0.01	0.78	0.0009
IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 4\%$								
RMSE : 0.041 (I) - <b>0.039 (II)</b> - 0.039 (III) - 0.042 (IV)								
0.0926	0.0156	-0.0138				0.121	0.001	0.0012
Non-IT, $\zeta = 0.1\%$ , $\pi^T = 4\%$								
RMSE : 0.022 (I) - 0.024 (II) - <b>0.018 (III)</b> - 0.028 (IV)								
0.11	-0.022	-0.109	0.067			0.01	0.189	0.0004
Non-IT, $\zeta = 1\%$ , $\pi^T = 4\%$								
RMSE : 0.024 (I) - 0.021 (II) - <b>0.017 (III)</b> - 0.02 (IV)								
0.109	-0.025	-0.11	0.076			0.964	0.263	0.0004

Tableau D.4 – Configuration 5 (2 paramètres)

$\beta_0$	$\beta_{\phi_\pi}$	$\beta_{\phi_u}$	$\beta_\zeta$	$\beta_P$	$\theta_{\phi_\pi}$	$\theta_{\phi_u}$	$\theta_\zeta$	$\theta_P$	$\sigma_L^2$
$\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.05\}$ et $\pi^T = 2\%$					RMSE : 0.031 (I) - <b>0.026</b> (II) - RMSE : 0.0847 (III)				
0.102	0.021	-0.08	-1.867	0.035	3.014	0.003	0.004	2.00	0.0004
$\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$ et $\pi^T = 2\%$					RMSE : <b>0.026</b> (I) - 0.029 (II) - RMSE : 0.0463 (III)				
0.223					1.689	0.398	0.018	0.744	0.002
$\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.4\}$ et $\pi^T = 2\%$					RMSE : 0.0386 (I) - <b>0.034</b> (II) - RMSE : 0.0567 (III)				
0.065	0.005	-0.023	-0.199	-0.001	4.00	0.16	0.017	0.346	0.0004
$\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$ et $\pi^T = 1\%$					RMSE : 0.027 (I) - <b>0.0258</b> (II) - RMSE : 0.0406 (III)				
0.2551	0.0484	-0.0990	-2.262	-0.0402	4.00	0.262	0.008	2.00	0.0002
$\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.4\}$ et $\pi^T = 4\%$					RMSE : 0.038 (I) - <b>0.031</b> (II) - RMSE : 0.069 (III)				
0.1188	0.0024	-0.0344	-4.0592	0.0348	4.00	0.4212	0.0008	2.00	0.0008

## IV Résultats complémentaires (config. 7)

$\sigma_{mutK} = \sigma_{mutW} = 0.05$  (choc 0)

			Degrés de transparence						
			0	1	2	3	4	5	6
commRate = 1	horizon = 1	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.1865	1.1681	1.1583	1.1855	1.2082	1.2134	1.1836
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.4443	0.4368	0.4496	0.455	0.4443	0.4576	0.4575
		<i>meanInfExpect</i>	<b>0.052</b>	<b>0.0218</b>	0.0253	0.0354	0.0395	0.0403	0.0273
		<i>meanInfRate</i>	<b>0.056</b>	0.0253	0.0296	0.0402	0.0458	0.0462	0.0318
		<i>varInfRate</i>	0.0045	0.0013	0.0015	0.0034	0.0039	0.0033	0.0016
		<i>meanOutputGap</i>	0.0175	0.0123	0.0215	0.014	0.0353	0.0276	0.0313
		<i>varOutputGap</i>	0.0038	0.0036	0.0043	0.0032	0.0093	0.007	0.0137
commRate = 1	horizon = 4	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.1684	1.2424	1.2335	1.2215	1.1667	1.2133	1.1941
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.4783	0.4764	0.4768	0.4295	0.4792	0.449	0.4516
		<i>meanInfExpect</i>	<b>0.0518</b>	0.0203	0.0443	0.0401	0.0272	0.0339	0.0324
		<i>meanInfRate</i>	<b>0.0555</b>	<b>0.0251</b>	0.053	0.0479	0.0317	0.0398	0.0389
		<i>varInfRate</i>	0.0051	0.0028	0.0024	0.0025	0.002	0.0017	0.0019
		<i>meanOutputGap</i>	0.0286	0.0151	0.0216	0.023	0.0068	0.0146	0.0263
		<i>varOutputGap</i>	0.0071	0.004	0.006	0.006	0.0017	0.0034	0.0064
commRate = 1	horizon = 8	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.2018	1.231	1.1933	1.2153	1.2297	1.2033	1.2017
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.504	0.5073	0.4886	0.5049	0.4884	0.4647	0.4879
		<i>meanInfExpect</i>	<b>0.055</b>	0.0122	0.0356	0.0397	0.039	0.0422	0.034
		<i>meanInfRate</i>	<b>0.0595</b>	<b>0.0203</b>	0.0422	0.0467	0.0565	0.0494	0.0404
		<i>varInfRate</i>	0.0044	0.0023	0.0022	0.0023	0.0022	0.0024	0.0016
		<i>meanOutputGap</i>	0.0153	0.0175	0.0299	0.0174	0.0396	0.0253	0.0554
		<i>varOutputGap</i>	0.0028	0.0086	0.0072	0.004	0.0136	0.0057	0.0127
commRate = 4	horizon = 1	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.181	1.2278	1.1904	1.1616	1.2163	1.1539	1.1762
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.4657	0.4395	0.4899	0.4644	0.4798	0.4491	0.4691
		<i>meanInfExpect</i>	<b>0.0564</b>	0.0231	0.033	0.0281	0.0363	0.0315	0.03
		<i>meanInfRate</i>	<b>0.0602</b>	<b>0.0206</b>	0.0388	0.0321	0.0444	0.036	0.0344
		<i>varInfRate</i>	0.0059	0.0025	0.002	0.0013	0.0025	0.0018	0.0021
		<i>meanOutputGap</i>	0.0174	0.0151	0.0117	0.0281	0.0136	0.02	0.0295
		<i>varOutputGap</i>	0.004	0.004	0.0025	0.0061	0.003	0.0041	0.0056
commRate = 4	horizon = 8	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.2332	1.2111	1.2152	1.226	1.2339	1.2029	1.2202
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.4834	0.4813	0.519	0.469	0.4882	0.4955	0.4986
		<i>meanInfExpect</i>	<b>0.0571</b>	0.018	0.0418	0.0404	0.0462	0.0393	0.0374
		<i>meanInfRate</i>	<b>0.0625</b>	<b>0.025</b>	0.0484	0.0495	0.0546	0.0463	0.0448
		<i>varInfRate</i>	0.006	0.0024	0.0023	0.0026	0.0028	0.0021	0.0021
		<i>meanOutputGap</i>	0.0104	0.0141	0.0263	0.026	0.0246	0.0279	0.0236
		<i>varOutputGap</i>	0.0022	0.0035	0.0061	0.0062	0.006	0.0055	0.006

Tableau D.6 – Statistiques descriptives sur les 109620 observations de chaque variable.

$\sigma_{mutK} = 0.05$  &  $\sigma_{mutW} = 0.4$  (choc 1)

		Degrés de transparence						
		0	1	2	3	4	5	6
commRate = 1 horizon = 1	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.3067	1.2024	1.32	1.2732	1.4048	1.5336	1.214
	<i>meanCoeffSubst</i>	<b>0.4702</b>	<b>0.46</b>	<b>0.488</b>	<b>0.4574</b>	<b>0.487</b>	<b>0.4737</b>	<b>0.4668</b>
	<i>meanInfExpect</i>	<b>0.12</b>	<b>0.0443</b>	<b>0.074</b>	<b>0.0801</b>	<b>0.0942</b>	<b>0.0957</b>	<b>0.0438</b>
	<i>meanInfRate</i>	<b>0.1148</b>	<b>0.0531</b>	<b>0.0856</b>	<b>0.0922</b>	<b>0.1091</b>	<b>0.1041</b>	<b>0.0427</b>
	<i>varInfRate</i>	0.0397	0.0132	0.0228	0.0357	0.0418	0.0516	0.0171
	<i>meanOutputGap</i>	<b>0.1229</b>	<b>0.0477</b>	<b>0.0866</b>	<b>0.0902</b>	<b>0.072</b>	<b>0.0577</b>	<b>0.0305</b>
commRate = 1 horizon = 4	<i>varOutputGap</i>	0.0549	0.02	0.042	0.045	0.0311	0.0454	0.0115
	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	<b>1.4076</b>	<b>1.331</b>	<b>1.2002</b>	<b>1.202</b>	<b>1.3594</b>	<b>1.2824</b>	<b>1.3018</b>
	<i>meanCoeffSubst</i>	0.4502	0.4545	0.4572	0.4749	0.4493	0.4587	0.4597
	<i>meanInfExpect</i>	<b>0.1397</b>	<b>0.023</b>	<b>0.0223</b>	<b>0.0142</b>	<b>0.0424</b>	<b>0.0244</b>	<b>0.0373</b>
	<i>meanInfRate</i>	<b>0.1495</b>	<b>0.045</b>	<b>0.039</b>	<b>0.0241</b>	<b>0.036</b>	<b>0.0363</b>	<b>0.038</b>
	<i>varInfRate</i>	0.0409	0.007	0.0057	0.0036	0.0069	0.0036	0.0153
commRate = 1 horizon = 8	<i>meanOutputGap</i>	<b>0.1425</b>	<b>0.0412</b>	<b>0.0191</b>	<b>0.0499</b>	<b>0.1147</b>	<b>0.1036</b>	<b>0.1125</b>
	<i>varOutputGap</i>	0.06	0.0148	0.0066	0.0239	0.0856	0.0494	0.06
	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.4061	1.3926	1.3379	1.3586	1.3428	1.2484	1.5137
	<i>meanCoeffSubst</i>	<b>0.4847</b>	<b>0.4989</b>	<b>0.4851</b>	<b>0.5298</b>	<b>0.4811</b>	<b>0.4447</b>	<b>0.5027</b>
	<i>meanInfExpect</i>	0.1487	0.0538	0.0557	0.0606	0.0662	0.0541	0.0838
	<i>meanInfRate</i>	0.156	0.0775	0.0804	0.0823	0.0822	0.0662	0.0838
commRate = 4 horizon = 1	<i>varInfRate</i>	0.0399	0.0209	0.0178	0.0299	0.0158	0.0155	0.0272
	<i>meanOutputGap</i>	0.1323	0.0273	0.007	0.026	0.0665	0.0438	0.1238
	<i>varOutputGap</i>	0.0534	0.0085	0.0013	0.0101	0.0307	0.022	0.0473
	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	<b>1.3949</b>	<b>1.2799</b>	<b>1.314</b>	<b>1.3748</b>	<b>1.2657</b>	<b>1.3721</b>	<b>1.2665</b>
	<i>meanCoeffSubst</i>	0.4591	0.4651	0.463	0.4623	0.465	0.4778	0.4489
	<i>meanInfExpect</i>	<b>0.1516</b>	<b>0.0572</b>	<b>0.0818</b>	<b>0.0853</b>	<b>0.0635</b>	<b>0.0755</b>	<b>0.0586</b>
commRate = 4 horizon = 8	<i>meanInfRate</i>	<b>0.1604</b>	0.0671	0.0914	0.1018	0.0759	0.0863	0.0697
	<i>varInfRate</i>	<b>0.0436</b>	0.029	0.0301	<b>0.0405</b>	0.023	<b>0.0317</b>	0.0226
	<i>meanOutputGap</i>	0.1632	0.0543	0.0741	0.0642	0.0531	0.0816	0.0498
	<i>varOutputGap</i>	0.0682	0.0242	0.037	<b>0.0276</b>	0.026	<b>0.0388</b>	0.026
	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.3729	1.3	1.3241	1.3111	1.2438	1.294	1.3448
	<i>meanCoeffSubst</i>	<b>0.4714</b>	<b>0.5221</b>	<b>0.4707</b>	<b>0.474</b>	<b>0.5283</b>	<b>0.5027</b>	<b>0.4815</b>
	<i>meanInfExpect</i>	0.1445	0.0485	0.0408	0.0487	0.0466	0.0511	0.0545
	<i>meanInfRate</i>	<b>0.1509</b>	0.0683	<b>0.0597</b>	<b>0.0679</b>	<b>0.0679</b>	<b>0.0676</b>	0.0762
	<i>varInfRate</i>	0.0411	0.0127	0.0262	0.01	0.004	0.0123	0.0141
	<i>meanOutputGap</i>	<b>0.1581</b>	<b>0.0247</b>	<b>0.0209</b>	<b>0.0258</b>	<b>0.0348</b>	<b>0.0429</b>	<b>0.0455</b>
	<i>varOutputGap</i>	0.0632	0.0072	0.0073	0.0068	0.0151	0.014	0.0161

Tableau D.7 – Statistiques descriptives sur les 109620 observations de chaque variable.

$\sigma_{mutK} = 0.05$  &  $\sigma_{mutW} = 0.4$  (choc 2)

		Degrés de transparence						
		0	1	2	3	4	5	6
commRate = 1	horizon = 1	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.1702	1.2412	1.2039	1.2046	1.1799	1.197
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.4707	0.2227	0.2717	0.2985	0.576	0.4471
		<i>meanInfExpect</i>	0.0412	0.0421	0.0369	0.0333	0.0303	0.0407
		<i>meanInfRate</i>	0.0447	0.0499	0.0436	0.0405	0.0373	0.0459
		<i>varInfRate</i>	0.0025	0.0037	0.0023	0.0028	0.0036	0.0037
		<i>meanOutputGap</i>	0.0178	0.0071	0.0279	0.0139	0.0172	0.011
		<i>varOutputGap</i>	0.0045	0.0012	0.0094	0.0022	0.004	0.0018
commRate = 1	horizon = 4	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.216	1.2081	1.1921	1.1887	1.2031	1.1617
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.361	0.3274	0.4349	0.2165	0.3545	0.3877
		<i>meanInfExpect</i>	0.0623	0.0409	0.0312	0.0368	0.0349	0.0274
		<i>meanInfRate</i>	0.0667	0.0409	0.0312	0.0368	0.0349	0.0274
		<i>varInfRate</i>	0.0066	0.0022	0.002	0.0026	0.002	0.0014
		<i>meanOutputGap</i>	0.0178	0.0205	0.0212	0.0169	0.0316	0.0269
		<i>varOutputGap</i>	0.0051	0.0072	0.0057	0.0045	0.0072	0.0059
commRate = 1	horizon = 8	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.2223	1.1992	1.177	1.2188	1.2019	1.1815
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.3375	0.3852	0.4233	0.4076	0.3893	0.4044
		<i>meanInfExpect</i>	0.0685	0.0389	0.034	0.0376	0.0408	0.0345
		<i>meanInfRate</i>	0.073	0.0455	0.04	0.0459	0.0478	0.0411
		<i>varInfRate</i>	0.0082	0.0023	0.002	0.0024	0.0025	0.0024
		<i>meanOutputGap</i>	0.02	0.027	0.022	0.0272	0.0222	0.0235
		<i>varOutputGap</i>	0.0045	0.0053	0.0042	0.0067	0.0052	0.005
commRate = 4	horizon = 1	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.1866	1.2143	1.1876	1.1817	1.1975	1.1809
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.2481	0.4521	0.6435	0.3969	0.4729	0.3642
		<i>meanInfExpect</i>	0.0568	0.0404	0.0391	0.0355	0.0385	0.0321
		<i>meanInfRate</i>	0.0605	0.0485	0.0433	0.0409	0.0472	0.0371
		<i>varInfRate</i>	0.0046	0.0027	0.0058	0.0018	0.003	0.002
		<i>meanOutputGap</i>	0.0106	0.0033	0.0162	0.0198	0.0222	0.0151
		<i>varOutputGap</i>	0.0021	0.0005	0.0037	0.0043	0.0044	0.003
commRate = 1	horizon = 8	<i>meanCoeffWageUpdate</i>	1.227	1.1939	1.2222	1.1763	1.2174	1.1829
		<i>meanCoeffSubst</i>	0.2527	0.4383	0.3558	0.4323	0.3837	0.4865
		<i>meanInfExpect</i>	0.0646	0.039	0.0417	0.0285	0.0426	0.0328
		<i>meanInfRate</i>	0.0689	0.0451	0.0489	0.0328	0.051	0.038
		<i>varInfRate</i>	0.0069	0.002	0.0022	0.0014	0.0026	0.0018
		<i>meanOutputGap</i>	0.0286	0.0327	0.022	0.0406	0.025	0.0291
		<i>varOutputGap</i>	0.012	0.0064	0.0052	0.0093	0.0057	0.0062

Tableau D.8 – Statistiques descriptives sur les 109620 observations de chaque variable.



# Bibliographie

- Alvarez, L., Dhyne, E., Hoeberichts, M., Kwapił, C., Le Bihan, H., Lünnemann, P., Sabbatini, R., Martins, F., Stah, H., Vermeulen, P. & Vilmunen, J. (2006), ‘Sticky prices in the euro area - a summary of new micro evidence’, *Journal of the European Economic Association* **4**(2-3), 575–584.
- Andersson, M. & Hofmann, B. (2010), Gauging the effectiveness of central bank forward guidance, in D. Cobham, O. Eitrheim, S. Gerlach & J. F. Qvigstad, eds, ‘Twenty Years of Inflation Targeting : Lessons Learned and Future Prospects’, Cambridge University Press.
- Arifovic, J. (1995), ‘Genetic algorithms and inflationary economies’, *Journal of Monetary Economics* **36**(1), 219–243.
- Arifovic, J., Bullard, J. & Kostyshyna, O. (2012), ‘Social learning and monetary policy rules’, *Economic Journal* . forthcoming.
- Armstrong, M. & Carignan, J. (2007), *Geostatistique linéaire – Application au domaine minier*, Ecole des mines de Paris – les Presses, Paris.
- Arthur, W. (2006), Out-of-Equilibrium Economics and Agent-Based Modeling, in L. Tesfatsion & K. Judd, eds, ‘Handbook of Computational Economic, vol. 2’, North-Holland, chapter 32, pp. 1551–64.
- Arthur, W. B., Durlauf, S. & Lane, D. A. (1997), *The Economy as an Evolving Complex System II*, Addison-Wesley.
- Ashraf, Q., Gershman, B. & Howitt, P. (2011), Banks, Market Organization, and Macroeconomic Performance : An Agent-Based Computational Analysis, NBER Working Papers 17102, National Bureau of Economic Research, Inc.
- Ashraf, Q. & Howitt, P. (2012), How Inflation Affects Macroeconomic Performance : An Agent-Based Computational Investigation, NBER Working Papers 18225, National Bureau of Economic Research, Inc.
- Bacharach, M. (1993), Variable Universe Games, in K. Binmore, A. Kirman & P. Tani, eds, ‘Frontiers of Game Theory’, MIT Press.
- Barro, R. & Gordon, D. (1983a), ‘A positive theory of monetary policy in a natural rate model’, *Journal of Political Economy* **91**(4), 589–610.
- Barro, R. & Gordon, D. (1983b), ‘Rules, Discretion and Reputation in a Model of Monetary Policy’, *Journal of Monetary Economics* **12**(1), 101–121.
- Batini, N. & Laxton, D. (2007), Under what conditions can inflation targeting be adopted ?, in F. S. Mishkin & K. Schmidt-Hebbel, eds, ‘Monetary Policy Under Inflation Targeting’, Vol. XI, Banco central de Chile.
- Benassy, J.-P. (1993), ‘Nonclearing Markets : Microeconomic Concepts and Macroeconomic Applications’, *Journal of Economic Literature* **31**(2), 732–61.

- Bernanke, B. (2004), Remarks. at the Meetings of the American Economic Association, San Diego, California, January 3, 2004.
- Bernanke, B. & Gertler, M. (2001), 'Should central banks respond to movements in asset prices', *American Economic Review* **91**, 253–257.
- Bernanke, B. & Mishkin, F. (1997), 'Inflation Targeting : A New Framework for Monetary Policy ?', *Journal of Economic Perspectives* **11**(2), 97 – 116.
- Bernanke, B. S., Laubach, T., Mishkin, F. & Posen, A. (1999), *Inflation Targeting : Lessons from the International Experience*, Princeton University Press. Princeton, N.J., USA.
- Berument, H. & Yuksel, E. (2007), 'Effects of adopting inflation targeting regimes on inflation variability', *Physica A* **375**, 265–273.
- Betbèze, J.-P., Bordes, C., Couppey-Soubeyran, J. & Plihon, D. (2011), *Banques centrales et stabilité financière*, La Documentation française / Conseil d'Analyse Economique.
- Blanchard, O., Dell'Ariccia, G. & Mauro, P. (2010), Rethinking Macroeconomic Policy. IMF Staff Position Note, janvier.
- Blanchard, O. & Kiyotaki, N. (1987), 'Monopolistic Competition and the Effects of Aggregate Demand', *The American Economic Review* **77**(4), 647–666.
- Blinder, A. (1997), 'What Central Bankers could Learn from Academics - and vice-versa', *Journal of Economic Perspectives* **11**(2), 3–19.
- Blinder, A. (1998), *Central Banking in Theory and Practice*, MIT Press. Cambridge.
- Blinder, A. S., Ehrmann, M., Fratzscher, M., De Haan, J. & Jansen, D.-J. (2008), 'Central Bank Communication and Monetary Policy : a survey of theory and evidence', *Journal of Economic Literature* **46**(4), 910–945.
- Boivin, J. (2011), Le mode de pensée des gens et son importance. Discours prononcé par Jean Boivin, sous-gouverneur à la Banque du Canada, devant l'Association canadienne de science économique des affaires, le 23 août, Kingston (Ontario).
- Borio, C. & Lowe, P. (2002), Asset prices, financial and monetary stability : Exploring the nexus, Working Papers 114, juillet, BIS.
- Brainard, W. C. (1967), 'Uncertainty and the Effectiveness of Policy', *The American Economic Review* **57**(2), 411–425.
- Branch, W., Carlson, J., Evans, G. & McGough, B. (2009), 'Monetary Policy, Endogenous Inattention and the Volatility Trade-off', *Economic Journal* **119**(534), 123–157.
- Brazier, A., Harrison, R., King, M. & Yates, T. (2008), 'The Danger of Inflating Expectations of Macroeconomic Stability : Heuristic Switching in an Overlapping-Generations Monetary Model', *International Journal of Central Banking* **4**(2), 219–254.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. & Stone, C. (1984), *CART : Classification and Regression Trees*. Wadsworth, Belmont, CA.

- Brenner, T. (1998), 'Can evolutionary algorithms describe learning processes?', *Journal of evolutionary economics* **8**(3), 271–283.
- Brenner, T. (2006), Agent learning representation : advice on modelling economic learning, in L. Tesfatsion & K. Judd, eds, 'Handbook of Computational Economic, vol. 2', North-Holland, chapter 18, pp. 895–947.
- Brunn, C. (1997), Agent-Based Keynesian Economics ; Methodological Issues and a Model. Computing in Economics and Finance 1997 20, Society for Computational Economics.
- Brunn, C. (2007), Monetary Policy in an Agent-Based Monetary Production Economy, Computing in economics and finance 2007, Society for Computational Economics.
- Brzoza-Brzezina, M. & Kot, A. (2008), The Relativity Theory Revisited : Is Publishing Interest Rate Forecasts Really so Valuable?, National Bank of Poland Working Papers 52, National Bank of Poland, Economic Institute.
- Bullard, M. & Mitra, K. (2002), 'Learning about monetary policy rules', *Journal of Monetary Economics* **49**(6), 1105–1129.
- Calvo, G. (1983), 'Staggered prices in a utility maximizing framework', *Journal of Monetary Economics* **12**, 383–398.
- Canzian, J. (2009), Three essays in agent-based macroeconomics. Doctoral Thesis, University of Trento CIFREM.
- Carpenter, S. (2004), 'Transparency and monetary policy : What does the academic literature tell policy makers?'. Finance and Economics Discussion Series 2004-35, Broad of Governors of the Federal Reserve System, Washington.
- Carroll, C. (2001), 'A theory of the consumption function, with and without liquidity constraints', *Journal of Economic Perspectives* **15**(3), 23–46.
- Cecchetti, S. (1998), 'Policy rules and targets : framing the central banker's problem', *Economic Policy Review* (Jun), 1–14.
- Cecchetti, S. & Hakko, C. (2010), 'Inflation targeting and private sector forecasts'. Research Working Paper RWP 10-01, Federal Reserve Bank of Kansas City.
- Chatterjee, S. (2002), 'The Taylor curve and the unemployment-inflation tradeoff', *Business Review* (Q3), 26–33.
- Cho, I.-K. & Sargent, T. (1996), Neural Networks for Encoding and Adapting in Dynamic Economies, in H. M. Amman, D. Kendrick & J. Rust, eds, 'Handbook of Computational Economic', North-Holland, pp. 441–470.
- Cho, I.-K. & Sargent, T. (1997), 'Learning to be credible'  
**URL:** <https://files.nyu.edu/ts43/public/research/phillnet6.pdf>
- Cioppa, T. (2002), Efficient nearly orthogonal and space-filling experimental designs for high-dimensional complex models. Doctoral Dissertation in philosophy in operations research, Naval postgraduate school.

- Clarida, R., Gali, J. & Gertler, M. (1999), 'The Science of Monetary Policy : a New Keynesian Perspective', *Journal of Economic Literature* **37**(4), 1661–1707.
- Cohen, K. J. (1960), 'Simulation of the firm', *The American Economic Review* **50**(2), 534–540.
- Colander, D., ed. (2006), *Post Walrasian Macroeconomics*, Cambridge Books, Cambridge University Press.
- Colander, D., Howitt, P., Kirman, A., Leijonhufvud, A. & Mehrling, P. (2008), 'Beyond DSGE Models : Toward an Empirically Based Macroeconomics', *American Economic Review* **98**(2), 236–40.
- Cornand, C. & Baeriswyl, R. (2010), 'Optimal monetary policy in response to supply inflation : the impact of central bank communication', *International Journal of Central Banking* **6**(2), 31–52.
- Cornand, C. & Baeriswyl, R. (2011), 'Transparency and Monetary Policy Effectiveness', *Annals of Economics and Statistics* **103/104**, 175–194.
- Cornand, C. & Heinemann, F. (2008), 'Optimal degree of public information dissemination', *The Economic Journal* **118**(528), 718–742.
- Cukierman, A. (1986), 'Central bank Behavior and Credibility : Some Recent Theoretical Developments', *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **May**, 5–17.
- Cukierman, A. (2001), Accountability, Credibility, Transparency and Stabilization Policy in the Euro-system, in C. Wyplosz, ed., 'The Impact of EMU on Europe and the Developing Countries', Oxford University Press, chapter 3, pp. 40–75.
- Cukierman, A. (2002), 'Are contemporary central banks transparent about economic models and objectives and what difference does it make?', *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **84**(4), 15–36.
- Cukierman, A. & Meltzer, A. (1986), 'A Theory of Ambiguity, Credibility, and Inflation under Discretion and Asymmetric Information', *Econometrica* **54**(5), 1099–1128.
- Cyert, R. & March, J. (1963), *A behavioral theory of the firm*, Englewood Cliffs.
- Dagnelie, P. (2008), 'De la régression simple et l'analyse de la variance aux modèles linéaires généralisés : synthèse et chronologie', *Revue Modulad* **39**, 107–136.
- Dale, S., Orphanides, A. & Osterholm, P. (2011), 'Imperfect Central Bank Communication : Information versus Distractions', *International Journal of Central Banking* **7**(2), 3–39.
- Darwin, C. (1859), *On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, John Murray, London, England.
- Dawid, H. (1999), *Adaptive Learning by Genetic Algorithms, Analytical Results and Applications to Economic Models*, 2nd extended and revised edition, Springer.
- De Grauwe, P. (2011), 'Animal spirits and monetary policy', *Economic Theory* **47**, 423–457.
- De Grauwe, P. (2012), *Lectures on Behavioral Macroeconomics*, Princeton University Press.
- Deissenberg, C., van der Hoog, S. & Dawid, H. (2008), 'EURACE : A massively parallel agent-based model of the European economy', *Applied Mathematics and Computation* **204**, 541–552.

- Delli Gatti, D., Gaffeo, E. & Gallegati, M. (2010), 'Complex agent-based macroeconomics : a research agenda for a new paradigm', *Journal of Economic Interaction and Coordination* **5**(2), 111–135.
- Delli Gatti, D., Gaffeo, E., Gallegati, M. & Palestrini, A. (2005), 'The Apprentice Wizard : Monetary Policy, Complexity And Learning', *New Mathematics and Natural Computation (NMNC)* **1**(01), 109–128.
- Demertzis, M. (2011), Public versus Private Information, DNB Working Papers 290, Netherlands Central Bank, Research Department.
- Demertzis, M., Marcellino, M. & Viegi, N. (2010), Anchors for Inflation Expectations, Economics Working Papers ECO2010/10, European University Institute.
- Demertzis, M. & Viegi, N. (2008), 'Inflation Targets as Focal Points', *International Journal of Central Banking* **4**(1), 55–87.
- Demertzis, M. & Viegi, N. (2009), 'Inflation targeting : a framework for communication', *The B.E. Journal of Macroeconomics* **99**(1), 44.
- Dennett, D. (1995), *Darwin's Dangerous Idea : Evolution and the Meanings of Life*, Odile Jacob.
- Dennis, R. & Ravenna, F. (2008), 'Learning and optimal monetary policy', *Journal of Economic Dynamics and Control* **32**(6), 1964–1994.
- Di Guilmi, C., Gallegati, M., Landini, S. & Stiglitz, J. (2012), Towards an Analytical Solution for Agent Based Models : an Application to a Credit Network Economy.  
**URL:** <http://ssrn.com/abstract=1943280>
- Diron, M. & Mojon, B. (2008), 'Are inflation targets good inflation forecasts?', *Economic Perspectives* (Q II), 33–45.
- Dixit, A. & Stiglitz, J. (1977), 'Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity', *The American Economic Review* **67**(3), 297–308.
- Dosi, G. (2012), *Further Essays on Economic Organization, Industrial Dynamics and Development*, Cheltenham : Edward Elgar.
- Dosi, G., Fagiolo, G. & Roventini, A. (2010), 'Schumpeter Meeting Keynes : A Policy-Friendly Model of Endogenous Growth and Business Cycles', *Journal of Economic Dynamics and Control* **34**(9), 1748–1767.
- Duffy, J. (2006), Agent-Based Models and Human Subject Experiments, in L. Tesfatsion & K. Judd, eds, 'Handbook of Computational Economic, vol. 2', North-Holland, chapter 19, pp. 949–1011.
- Durrande, N., Ginsbourger, O. & Roustant, O. (2012), 'Additive covariance kernels for high-dimensional Gaussian process modeling', *Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse* . forthcoming.
- Eggertsson, G. & Woodford, M. (2003), 'The Zero Bound on Interest Rates and Optimal Monetary Policy', *Brookings Papers on Economic Activity* **1**, 139–211.
- Eijffinger, S. & van der Cruijsen, C. (2007), The Economic Impact of Central Bank Transparency : A Survey, CEPR Discussion Papers 6070, C.E.P.R. Discussion Papers.

- Eusepi, S. (2005), Central bank transparency under model uncertainty, Staff Reports 199, Federal Reserve Bank of New York.
- Eusepi, S. & Preston, B. (2010), ‘Central bank communication and expectations stabilization’, *American Economic Association* **2**(3), 235–271.
- Evans, G. W. & Honkapohja, S. (2001), *Learning and Expectations in Macroeconomics*, Princeton University Press.
- Fama, E. (1970), ‘Efficient Capital Markets : A Review of Theory and Empirical Work’, *Journal of Finance* **25**, 383–417.
- Fang, K., Lin, D., Winker, P. & Zhang, Y. (2000), ‘Uniform design : Theory and application’, *Technometrics* **42**(3), 237–248.
- Faust, J. & Henderson, D. (2004), ‘Is Inflation Targeting Best-practice for Monetary Policy ?’, *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **86**(4), 117–143.
- Faust, J. & Svensson, L. (2001), ‘Transparency and Credibility : Monetary Policy with Unobservable Goals’, *International Economic Review* **42**(2), 369–397.
- Faust, J. & Svensson, L. (2002), ‘the Equilibrium Degree of Transparency and Control in Monetary Policy’, *Journal of Money, Credit and Banking* **34**(2), 520–539.
- Frey, C. & Patil, S. (2002), ‘Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods ’, *Risk Analysis* **22**(3), 553–578.
- Friedman, M. (1957), *A Theory of the Consumption Function*, Princeton University Press.
- Friedman, M. (1968), ‘The role of monetary policy’, *The American Economic Review* **58**(1), 1–17.
- Fukac, M. (2008), Heterogeneous Expectations, Adaptive Learning, and Forward-Looking Monetary Policy, Reserve Bank of New Zealand Discussion Paper Series DP2008/07, Reserve Bank of New Zealand.
- Gaffeo, E., DelliGatti, D., Desiderio, S. & Gallegati, M. (2008), ‘Adaptive Microfoundations for Emergent Macroeconomics’, *Eastern Economic Journal* **34**(4), 441–463.
- Gali, J. (2001), Targeting Inflation in an Economy with Staggered Price Setting, Working Papers Central Bank of Chile 123, Central Bank of Chile.
- Gali, J. (2002), Targeting Inflation in a Economy with Staggered Price Setting, in N. Loayza, R. Soto & K. S.-H. S. Editor), eds, ‘Inflation Targeting : Desing, Performance, Challenges’, Vol. 5 of *Central Banking, Analysis, and Economic Policies Book Series*, Central Bank of Chile, chapter 6, pp. 271–294.
- Gali, J. (2008), *Monetary Policy, Inflation, and the Business Cycle : An Introduction to the New Keynesian Framework*, Princeton University Press.
- Garfinkel, M. & Oh, S. (1995), ‘When and how much to talk, credibility and flexibility in monetary policy with private information’, *Journal of Monetary Economics* **35**(2), 341–357.

- Geider, W. (1989), *Secrets of the Temple : How the Federal Reserve Runs the Country*, Simon & Schuster Adult Publishing Group.
- Geraats, P. (2002), 'Central Bank Transparency', *The Economic Journal* **112**(483), 532–565.
- Geraats, P. (2009), 'Trends in Monetary Policy Transparency', *International Finance* **12**(2), 235–268.
- Giannoni, P. (2007), 'Robust optimal monetary policy in a forward-looking model with parameter and shock uncertainty', *Journal of Applied Econometrics* **22**(1), 179–213.
- Goodfriend, M. (1986), 'Monetary Mystique : Secrecy and Central Banking', *Journal of Monetary Economics* **17**(1), 63–92.
- Goodfriend, M. & King, R. (1997), The New Neoclassical Synthesis and the Role of Monetary Policy, in 'NBER Macroeconomics Annual 1997, Volume 12', pp. 231 – 296.
- Goodhart, C. (2009), 'The interest rate conditioning assumption', *International Journal of Central Banking* **5**(2), 85–108.
- Goodhart, C. (2011), La surveillance macro-prudentielle, in 'Banques centrales et stabilité financière', La Documentation française / Conseil d'Analyse Economique, pp. 295–316.
- Gosselin, P., Lotz, A. & Wyplosz, C. (2008), 'The Expected Interest Rate Path : Alignment of Expectations vs. Creative Opacity', *International Journal of Central Banking* **4**(3), 145–185.
- Goupy, J. & Creighton, L. (2007), *Introduction to Design of Experiments with JMP Examples, Third Edition*, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Greenspan, A. (2001), Opening remarks, in 'Achieving Price Stability : a Symposium Sponsored by the Federal Reserve Bank of Kansas', Toronto, Canada.
- Haber, G. (2008), 'Monetary and Fiscal Policy Analysis with an Agent-Based Macroeconomic Model', *Journal of Economics and Statistics (Jahrbuecher fuer Nationaloekonomie und Statistik)* **228**(2+3), 276–295.
- Hallett, H. & Libich, J. (2006), Central Bank Independence, Accountability and Transparency : Complements or Strategic Substitutes ?, CEPR Discussion Papers 5470, C.E.P.R. Discussion Papers.
- Heinemann, M. (2000), 'Adaptive learning of rational expectations using neural networks', *Journal of Economic Dynamics & Control* **24**, 1007–1026.
- Hellwig, M. (2002), 'Public Information, Private information and the Multiplicity of Equilibria in Coordination Games', *Journal of Economic Theory* **107**(2), 91–222.
- Hellwig, M. (2004), Heterogeneous Information and the Benefits of Public Information Disclosures, UCLA Economics Online Papers 283, UCLA Department of Economics.
- Herbrich, R., Keilbach, M., Graepel, T., Bollmann-Sdorra, P. & Obermayer, K. (1999), 'Neural Networks in Economics : Background, Applications and New Developments', *Advances in Computational Economics Computational Techniques for Modelling Learning in Economics* **11**, 169–196.
- Hicks, J. R. (1937), 'Mr. Keynes and the "Classics" : A Suggested Interpretation', *Econometrica* **5**(2), 147–159.

- Hildebrand, P. M. (2006), 'Monetary Policy and Financial Markets', *Financial Markets and Portfolio Management* **20**, 7–18.
- Holland, J. (1975), *Adaptation in natural and artificial systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*, U Michigan Press, Oxford, England.
- Holland, J., Goldberg, D. & Booker, L. (1989), 'Classifier Systems and Genetic Algorithms ', *Artificial Intelligence* **40**, 235–289.
- Holland, J. & Miller, J. (1991), 'Artificial Adaptive Agents in Economic Theory', *AER Papers and Proceedings* **91**(2), 365–370.
- Hommes, C. H. (2006), Heterogeneous Agent Models in Economics and Finance, in L. Tesfatsion & K. L. Judd, eds, 'Handbook of Computational Economics', Vol. 2 of *Handbook of Computational Economics*, Elsevier, chapter 23, pp. 1109–1186.
- Honkapohja, S. & Mitra, K. (2006), 'Learning Stability in Economies with Heterogeneous Agents', *Review of Economic Dynamics* **9**(2), 284–309.
- Howitt, P. (2012), 'What have central bankers learned from modern macroeconomic theory ?', *Journal of Macroeconomics* **34**(1), 11–22.
- James, J. G. & Lawler, P. (2011), 'Optimal Policy Intervention and the Social Value of Public Information', *American Economic Review* **101**(4), 1561–74.
- Jennings, N. (2000), 'On agent-based software engineering', *Artificial Intelligence* **17**, 277–296.
- Jensen, H. (2002), 'Optimal Degrees of Transparency in Monetary Policymaking', *Scandinavian Journal of Economics* **104**(3), 399–422.
- Jeong, S., Murayama, M. & Yamamoto, K. (2005), 'Efficient Optimization Design Method Using Kriging Model', *Journal of Aircraft* **42**, 413–420.
- Johnson, D. R. (2002), 'The effets of inflation targeting on the behavior of expected inflation : evidence from an 11 country panel', *Journal of Monetary Economics* **49**(8), 1521–1538.
- Jourdan, A. (2005), 'Planification d'expériences numériques', *Revue MODULAD* **33**, 63–73.
- Judd, K. (2006), Computationally Intensive Analyses in Economics, in L. Tesfatsion & K. Judd, eds, 'Handbook of Computational Economic, vol. 2', North-Holland, chapter 17, pp. 881–894.
- Kahn, S. (1997), 'Evidence of Nominal Wage Stickiness from Microdata', *The American Economic Review* **87**(5), 993–1008.
- Kahneman, D. (2003), 'Maps of bounded rationality : Psychology for behavioral economics', *American Economic Review* **93**(5), 1449–1475.
- Kahneman, D. & Tversky, A. (1973), 'On the psychology of prediction', *Psychological Review* **80**(4), 237–251.
- Kahneman, D. & Tversky, A. (1974), 'Judgment under Uncertainty : Heuristics and Biases', *Science* **185**(4157), 1124–1131.

- King, M. (1997), ‘Changes in the UK Monetary Policy : Rules and Discretion in Practice’, *Journal of Monetary Economics* **39**(1), 81–97.
- King, M. (2005), ‘Monetary policy : Practice ahead of theory’. Mais Lecture 200, Cass Business School.
- King, R. G. & Wolman, A. L. (1996), ‘Inflation Targeting in a St. Louis Model of the 21st Century’, *NBER Working Paper* **5507**.
- Kirman, A. (1992), ‘Whom or What Does the Representative Individual Represent ?’, *Journal of Economic Perspectives* **6**(2), 117–36.
- Klügl, F. (2008), A validation methodology for agent-based simulations, in R. Wainwright & H. Hadad, eds, ‘Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Applied Computing (SAC)’, Fortaleza, Brazil, March 16-20’.
- Knight, F. (1921), *Risk, Uncertainty, and Profits*, Chicago University Press, Chicago.
- Kuttner, K. (2004), ‘The Role of Policy Rules in Inflation Targeting’, *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **86**(4), 89–111.
- Kuttner, K. & Posen, A. (1999), ‘Does talk matter after all ? Inflation Targeting and Central Bank Behavior’. Staff Reports 88, Federal Reserve Bank of New York.
- Kydland, F. & Prescott, E. (1977), ‘Rules rather than discretion : The inconsistency of optimal plans’, *Journal of Political Economy* **85**(3), 473–91.
- Kydland, F. & Prescott, E. (1982), ‘Time to Build and Aggregate Fluctuations’, *Journal of Political Economy* **50**(6), 1345–1371.
- Lamla, M. & Lein, S. (2011), ‘What matters when ? The impact of ECB communication on financial market expectations’, *Applied Economics* **43**(28), 4289–4309.
- Layard, R., Nickell, S. & Jackman, R. (1991), *Unemployment. Macroeconomic Performance and the Labour Market*, Oxford University Press.
- Le Bihan, H. & Sahuc, J.-G. (2001), ‘Règles de politique monétaire en présence d’incertitude : une synthèse’, *Revue d’Economie Politique* **112**, 349–386.
- LeBaron, B. (2002), Building the Santa Fe Artificial Stock Market. Working Paper, Brandeis University.
- Leijonhufvud, A. (2006), Agent-based Macro, in L. Tesfatsion & K. Judd, eds, ‘Handbook of Computational Economic, vol. 2’, North-Holland, chapter 36, pp. 1625–1646.
- Leiser, D. & Aroch, R. (2008), Lay understanding of macroeconomic causation : the good-begets-good heuristic, in E. Kirchler & C. Roland-Levy, eds, ‘Special Issue of Applied Psychology : an International Review’.
- Lengnick, M. (2011), Agent-Based Macroeconomics : A Baseline Model, Economics Working Papers 2010-10, Christian-Albrechts-University of Kiel, Department of Economics.
- Lengnick, M. & Wohltmann, H.-W. (2012), ‘Agent-based financial markets and New Keynesian macroeconomics : A synthesis’, *Journal of Economic Interaction and Coordination*. forthcoming.

- Levin, A., Natalucci, F. & Piger, J. (2004), 'The macroeconomic effects of inflation targeting', *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **86**, 51–80.
- Levine, D. (2011), Virtual Model Validation for Economics, Levine's Working Paper Archive 786969000000000008, David K. Levine.
- Lin, S. & Ye, H. (2007), 'Does inflation targeting really make a difference? Evaluating the treatment effect of inflation targeting in seven industrial countries', *Journal of Monetary Economics* **54**(8), 2521–2533.
- Lipinska, A. & Yates, T. (2010), How clarity about the inflation objective anchors inflation expectations? mimeo, Bank of England.
- Lipsey, R. G. (1960), 'The Relation Between Unemployment and the Rate of Change of Money Wage Rates in the United Kingdom, 1862–1957 : A further analysis", *Economica New Series* **Feb.**
- Lucas, R. (2003), 'Macroeconomic Priorities', *American Economic Review* **93**(1), 1–14.
- Lucas, R. E. J. (1972), 'Expectations and the neutrality of money', *Journal of Economic Theory* **4**(2), 103–124.
- Lucas, R. J. (1976), 'Econometric policy evaluation : A critique', *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* **1**(1), 19–46.
- Lucas, R. J. (1980), 'The Death of Keynesian Economics', *Issues and Ideas* pp. 18–19. University of Chicago, Chicago, IL.
- Mandel, A., Jaeger, C., Fürst, S., Lass, W., Lincke, D., Meissner, F., Pablo-Marti, F. & Wolf, S. (2010), Agent-based dynamics in disaggregated growth models, Documents de travail du Centre d'Economie de la Sorbonne 10077, Université Panthéon-Sorbonne (Paris 1), Centre d'Economie de la Sorbonne.
- Marcet, A. & Sargent, T. (1989), Least Squares Learning and the Dynamics of Hyperinflation, in 'Sunspots, Complexity, and Chaos', W. Barnett, J. Geweke and K. Shell edn, Cambridge University Press.
- Masters, T. (1993), *Practical Neural Network recipes in C++*, Academic Press, New York.
- Matheron, G. (1963), 'Principles of geostatistics', *Economic Geology* **58**(8), 1246–1266.
- McCallum, B. (1997), 'Crucial Issues Concerning Central Bank Independence', *Journal of Monetary Economics* **39**(1), 99–112.
- McCallum, B. (1998), Inflation targeting in Canada, New Zealand, Sweden, the United Kingdom, and in General. NBER Working Papers 5579.
- McGill, R., Tukey, J. & Larsen, W. (1978), 'Variations of Box Plots', *The American Statistician* **32**(1), 12–16.
- Mebane, W. J. & Sekhon, J. (2011), 'Genetic Optimization Using Derivatives : The rgenoud Package for R', *Journal of Statistical Software* **42**(11), 1–26.
- Mehrotra, K., Mohan, C. K. & Ranka, S. (1997), *Elements of Artificial Neural Networks*, MIT Press.

- Miller, J. & Page, S. (2007), *Complex Adaptive Systems*, Princeton University Press.
- Miller, M. (2009), 'Towards new microfoundations for macro', *Central Banking* **20**(1), 53–58.
- Minegishi, M. & Cournède, B. (2009), The Role of Transparency in the Conduct of Monetary Policy, OECD Economics Department Working Papers 724, OECD Publishing.
- Minsky, H. (1977), A Theory of Systemic Fragility, in E. Altman & A. Sametz, eds, 'Financial Crises : Institutions and Markets in a Fragile Environment', New York, NY : John Wiley and Sons, pp. 138–152.
- Morris, S. & Shin, H. (2002), 'Social value of public information', *American Economic Review* **92**(5), 1521–1534.
- Muth, R. (1961), 'Rational expectations and the theory of price movements', *Econometrica* **29**(3), 315–335.
- Nelson, E. (2008), 'Why Money Growth Determines Inflation in the Long Run : Answering the Woodford Critique', *Journal of Money, Credit and Banking* **40**(8), 1791–1814.
- Nelson, R. R. & Winter, S. G. (1982), 'The Schumpeterian Tradeoff Revisited', *American Economic Review* **72**(1), 114–32.
- Neumann, M. J. & von Hagen, J. (2002), 'Does Inflation Targeting Matter?', *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **Jul**, 127–148.
- Obstfeld, M. & Rogoff, K. (1995), 'Exchange Rate Dynamics Redux', *Journal of Political Economy* **103**(3), 624–60.
- Oeffner, M. (2008), Agent-Based Keynesian Macroeconomics – an evolutionary model embedded in an agent-based computer simulation. Doctoral dissertation, Bayerische Julius - Maximilians Universität, Wurzburg.
- Orphanides, A. (2009), 'Reflections on Inflation Targeting'. Speech at the 6th Norges Bank Monetary Policy Conference on Inflation Targeting Twenty Years On , Oslo, 11 June 2009.
- Orphanides, A. & Williams, J. C. (2005), Imperfect knowledge, inflation expectations and monetary policy, in B. Bernanke & M. Woodford, eds, 'Inflation Targeting', University of Chicago Press.
- Orphanides, A. & Williams, J. C. (2007), Inflation Targeting under Imperfect Knowledge, in F. S. Mishkin & K. Schmidt-Hebbel, eds, 'Monetary Policy Under Inflation Targeting', Vol. XI, Banco central de Chile, Santiago, Chile.
- Page, S. (2004), 'Aggregation in Agent-Based Models of Economics', *The Knowledge Engineering Review* **00**(0), 1–24.
- Persson, T. & Tabellini, G. (1993), 'Designing institutions for monetary stability', *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* **39**(1), 53–84.
- Pétursson, T. (2010), Inflation Control Around the World : Why Are Some Countries More Successful Than Others ?, in D. Cobham, O. Eitrheim, S. Gerlach & J. Qvigstad, eds, 'Twenty Years of Inflation Targeting : Lessons Learned and Future Prospects', Cambridge University Press : Cambridge.

- Phelps, E. S. (1967), 'Phillips Curves, Expectations of Inflation and Optimal Unemployment over Time', *Economica* **34**(135), 254–281.
- Phelps, E. S. & Taylor, J. B. (1977), 'Stabilizing Powers of Monetary Policy under Rational Expectations', *Journal of Political Economy* **85**(1), 163–90.
- Phillips, A. W. (1958), 'The Relation between Unemployment and the Rate of Change of Money Wage Rates in the United Kingdom, 1861-1957', *Economica New Series* **25**(2), 283–299.
- Preston, B. (2006a), 'Adaptive Learning, Forecast-Based Instrument Rules and Monetary Policy', *Journal of Monetary Economics* **53**(3), 507–535.
- Preston, B. (2006b), 'Adaptive learning, forecast-based instrument rules and monetary policy', *Journal of Monetary Economics* **53**(3), 507–535.
- R Development Core Team (2009), *R : A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0.  
**URL:** <http://www.R-project.org>
- Raberto, M., Teglio, A. & Cincotti, S. (2007), Monetary Policy Experiments in an Artificial Multi-Market Economy with Reservation Wages, in A. Consiglio, ed., 'Artificial Markets Modeling : Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 599', Springer-Verlag.
- Raberto, M., Teglio, A. & Cincotti, S. (2008), 'Integrating Real and Financial Markets in an Agent-Based Economic Model : An Application to Monetary Policy Design', *Computational Economics* **32**, 147–162.
- Raberto, M., Teglio, A. & Cincotti, S. (2010), 'Credit Money and Macroeconomic Instability in the Agent-based Model and Simulator Eurace', *Economics : The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* **4**(2010-26).
- Ram, R. (1985), 'Level and Variability of Inflation : Time-Series and Cross-Section Evidence from 117 Countries', *Economica New Series* **52**(206), 209–223.
- Robinson, J. (1979), *The Generalisation of the General Theory and others essays*, 2nd edn, the MacMillan Press LTD.
- Robinson, S. (1997), Simulation model verification and validation : Increasing the users' confidence, in K. Andradottir, K. Healy, D. Withers & B. Nelson, eds, 'Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference'.
- Roger, S. (2009), Inflation Targeting at 20 : Achievements and Challenges, IMF Working Papers 09/236, International Monetary Fund.
- Roger, S. & Stone, M. (2005), On Target ? The International Experience with Achieving Inflation Targets, IMF Working Papers, Aug. 05/163, International Monetary Fund.
- Rogoff, K. (1985), 'The Optimal Degree of Commitment to an Intermediate Monetary Target', *The Quarterly Journal of Economics* **100**(4), 1169–89.
- Romer, C. & Romer, D. (2000), 'Federal Reserve Information and the Behavior of Interest Rates', *American Economic Review* **90**(3), 429–457.

- Roos, M. W. & Schmidt, U. (2012), 'The importance of time series extrapolation for macroeconomic expectations', *German Economic Review* **13**(2), 196–210.
- Rotemberg, J. & Woodford, M. (1998), An Optimization-Based Econometric Framework for the Evaluation of Monetary Policy : Expanded Version, NBER Technical Working Papers 0233, National Bureau of Economic Research, Inc.
- Roustant, O., Ginsbourger, D. & Deville, Y. (2010), 'DiceKriging, DiceOptim : Two R packages for the analysis of computer experiments by kriging-based metamodeling and optimization', *Journal of Statistical Software* **VV**(II).
- Rudebusch, G. D. & Svensson, L. E. (1999), Policy Rules for Inflation Targeting, in 'Monetary Policy Rules', NBER Chapters, National Bureau of Economic Research, Inc, pp. 203–262.
- Rudebusch, G. & Williams, J. (2008), Revealing the Secrets of the Temple : The Value of Publishing Central Bank Interest Rate Projections, in 'Asset Prices and Monetary Policy', NBER Chapters, National Bureau of Economic Research, Inc, pp. 247–289.
- Rumelhart, D., Hinton, G. & Williams, R. (1986), 'Learning representations by back-propagating errors', *Nature* **323**, 533–536.
- Sacks, J., Welch, W., Mitchell, T. & Wynn, H. (1989), 'Design and analysis of computer experiments', *Statistical Science* **4**(4), 409–423.
- Salge, M. (1997), *Rational Bubbles : Theoretical Basis, Economic Relevance, and Empirical Evidence with a Special Emphasis on the German Stock Market*, Springer-Verlag, Berlin.
- Salle, I. & Yıldızoglu, M. (2012), Efficient Sampling and Metamodeling for Computational Economic Models, Cahiers du GREThA 2012-18, Groupe de Recherche en Economie Théorique et Appliquée.
- Salle, I., Yıldızoglu, M. & Sénégas, M.-A. (2012), Inflation targeting in a learning economy : An ABM perspective, Cahiers du GREThA 2012-15, Groupe de Recherche en Economie Théorique et Appliquée.
- Salle, I., Zumpe, M., Yıldızoglu, M. & Sénégas, M.-A. (2012), Modelling Social Learning in an Agent-Based New Keynesian Macroeconomic Model, Cahiers du gretha, no. 2012-20, Groupe de Recherche en Economie Théorique et Appliquée.
- Salmon, M. (1995), Bounded Rationality and Learning ; Procedural Learning, in 'Learning and rationality in economics', Oxford : Basil Blackwell edn, Alan P. Kirman and Mark Salmon, chapter 8, pp. 236–275.
- Sanchez, S. (2005), Nolh designs spreadsheet . Software available online via <http://diana.cs.nps.navy.mil/SeedLab/>.
- Sargent, R. (2010), Verification and validation of simulation models, in B. Johansson, S. Jain, J. Montoya-Torres, J. Hugan & E. Yucesan, eds, 'Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference'.
- Sargent, T. (1993), *Bounded Rationality in Macroeconomics*, Oxford University Press.
- Sargent, T. J. (1999), *The conquest of American inflation*, MIT Press.

- Sargent, T. J. & Wallace, N. (1975), "rational" expectations, the optimal policy instrument and the optimal money supply rule', *Journal of Political Economy* **83**(2).
- Sargent, T. & Wallace, N. (1987), Inflation and the government budget constraint, in A. Razin & E. Sadka, eds, 'Economic Policy in Theory and Practice', London, Macmillan.
- Schmidt-Hebbel, K. (2009), Inflation Targeting Twenty Years on : Where, When, Why, With what Effects, What lies ahead ?, Documentos de Trabajo 360, Instituto de Economia. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Schmidt-Hebbel, K. & Walsh, C. (2009), Monetary Policy under Uncertainty and Learning : An Overview, in K. Schmidt-Hebbel, C. E. Walsh & N. Loayza, eds, 'Monetary Policy under Uncertainty and Learning', Vol. 13 of *Central Banking, Analysis, and Economic Policies Book Series*, Central Bank of Chile, chapter 1, pp. 1–25.
- Seppecher, P. (2010), 'Dysfonctionnement bancaire, bulle du crédit et instabilité macroéconomique dans une économie monétaire dynamique et complexe', *Revue économique* **61**(3), 441–449.
- Seppecher, P. (2012), 'Flexibility of wages and macroeconomic instability in an agent-based computational model with endogenous money', *Macroeconomic Dynamics*. forthcoming.
- Sgroia, D. & Zizzo, D. (2007), 'Neural networks and bounded rationality', *Physica A* **375**, 717–725.
- Sgroia, D. & Zizzo, D. (2009), 'Learning to play  $3 \times 3$  games : Neural networks as bounded-rational players', *Journal of Economic Behavior & Organization* **69**, 27–38.
- Sibert, A. (2003), 'Monetary Policy Committees : Individual and Collective Reputations', *Review of Economic Studies* **70**(3), 649–665.
- Simon, H. (1955), 'A behavioural model of rational choice', *Quarterly Journal of Economics* **69**, 99–118.
- Simon, H. (1971), The Theory of Problem Solving, in 'IFIP Congress (1)', pp. 261–277.
- Simon, H. (1976), From substantial to procedural rationality, in 'Method and Appraisal in Economics', cambridge university press edn, S. J. Latsis, pp. 129–148.
- Simon, H. A. (1996), *The Sciences of the Artificial*, Cambridge, Mass. : MIT Press, 3rd Edition.
- Söderström, U. (2002), 'Monetary Policy with Uncertain Parameters', *Scandinavian Journal of Economics* **104**(1), 125–145.
- Stein, J. (1989), 'Cheap talk and the Fed : A theory of imprecise policy announcements', *American Economic Review* **79**(1), 32–42.
- Summers, L. (1991), 'Panel Discussion : Price Stability, how Should Long-Term Monetary Policy be Determined?', *Journal of Money, Credit and Banking* **23**, 625–631.
- Svensson, L. (1997a), 'Inflation forecast targeting : Implementing and monitoring inflation targets', *European Economic Review* **41**(6), pp. 1111–1146.
- Svensson, L. (1997b), 'Optimal Inflation Targets, Conservative Central Banks and linear inflation Contracts', *American Economic Review* **87**(1), 98–114.

- Svensson, L. (1999), ‘Inflation Targeting as a Monetary Policy Rule’, *Journal of Monetary Economics* **43**(3), 607–654.
- Svensson, L. (2002), ‘Inflation Targeting : Should it be modeled as an instrument rule or a targeting rule ?’, *European Economic Review* **46**(4-5), 771–780.
- Svensson, L. (2003), ‘What Is Wrong with Taylor Rules ? Using Judgment in Monetary Policy through Targeting Rules’, *Journal of Economic Literature* **41**(2), 426–477.
- Svensson, L. (2006), ‘Social Value of Public Information : Morris and Shin (2002) Is Actually Pro Transparency, Not Con.’, *American Economic Review* **96**(1), 448–51.
- Svensson, L. (2007), Optimal inflation targeting : Further developments of inflation targeting, in F. S. Mishkin & K. Schmidt-Hebbel, eds, ‘Monetary Policy Under Inflation Targeting’, Vol. XI, Banco central de Chile, Santiago, Chile.
- Svensson, L. (2008), Beyond Rational Expectations : Practical Policy Considerations – comment on Sims, Technical report. BIS Annual Conference, Luzern, Suisse, 26/27 juin.
- Svensson, L. (2009), ‘Transparency under Flexible Inflation Targeting : Experiences and Challenges’, *Sveriges Riksbank Economic Review* **1**, 5–44.
- Svensson, L. E. (2010), Inflation Targeting, in B. M. Friedman & M. Woodford, eds, ‘Handbook of Monetary Economics’, Vol. 3 of *Handbook of Monetary Economics*, Elsevier, chapter 22, pp. 1237–1302.
- Taylor, J. (1993), ‘Discretion versus policy rules in practice’, *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy* **39**(1), 195–214.
- Taylor, J. B. (1975), ‘Monetary policy during a transition to rational expectations’, *The Journal of Political Economy* **83**(5), 1009–21.
- Taylor, J. B. (1979), ‘Estimation and Control of a Macroeconomic Model with Rational Expectations’, *Econometrica* **47**(5), 1267–86.
- Tesfatsion, L. (2003), ‘Agent-based computational economics : modeling economies as complex adaptive systems’, *Information Sciences* **149**(4), 262–68.
- Tesfatsion, L. (2006a), Agent-Based Computational Economics : A Constructive Approach to Economic Theory, in L. Tesfatsion & K. Judd, eds, ‘Handbook of Computational Economic, vol. 2’, North-Holland, chapter 16, pp. 831–894.
- Tesfatsion, L. (2006b), Agent-based computational economics and macroeconomics, in D. Colander, ed., ‘Post Walrasian Macroeconomics : Beyond the Dynamic Stochastic General Equilibrium Model’, Cambridge University Press, chapter 16, pp. 175–202.
- Tesfatsion, L. & Judd, K. L., eds (2006), *Handbook of Computational Economics*, Vol. 2 of *Handbook of Computational Economics*, Elsevier.
- Tetlow, R. J. & von zur Muehlen, P. (2001), ‘Robust monetary policy with misspecified models : Does model uncertainty always call for attenuated policy ?’, *Journal of Economic Dynamics & Control* **25**, 911–949.

- Theil, H. (1958), *Economic forecasts and policy*, North-Holland, Amsterdam.
- Therneau, T. & Atkinson, E. (1997), An introduction to recursive partitioning using the RPART routine, Technical report, Mayo Foundation.
- Thornton, D. (2009), The Evolution to Inflation Targeting : How Did We Get Here and Where Do We Need to Go ?, Prepared for the 6th Norges Bank Monetary Policy Conference, June 11-12, Federal Reserve Bank of St. Louis.
- Tobin, J. (1977), ‘How Dead Is Keynes?’, *Economic Inquiry* **15**(4), 459–468.
- Tovar, C. (2009), ‘DSGE Models and Central Banks’, *Economics - The Open-Access, Open-Assessment E-Journal* **3**(16), 1–31. Kiel Institute for the World Economy.
- Trichet, J.-C. (2010), Approches de la politique monétaire revisitée : leçons tirées de la crise. Discours prononcé à la Banque Centrale Européenne, le 18 novembre 2010, Francfort.
- Ueda, K. (2010), ‘Central Bank Communication and Multiple Equilibria’, *International Journal of Central Banking* **6**(3), 145–167.
- Vallée, T. & Yıldızoglu, M. (2004), ‘Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie’, *Revue d’Economie Politique*, **114**, 711–745.
- Vallée, T. & Yıldızoglu, M. (2009), ‘Convergence in the finite Cournot oligopoly with social and individual learning’, *Journal of Economic Behavior & Organization* **72**(2), 670–690.
- van Beers, W. & Kleijnen, J. (2004), *Kriging interpolation in simulation : a survey*, R .G. Ingalls, M. D. Rossetti, J. S. Smith, and B. A. Peters, eds, chapter Computer experiments. In *Handbook of Statistics*.
- Vickers, J. (1998), Inflation Targeting in Practice : the UK Experience, Quarterly bulletin november, Bank of England.
- Vriend, N. (2000), ‘An illustration of the essential difference between individual and social learning, and its consequences for computational analyses’, *Journal of Economic Dynamics and Control* **24**, 1–19.
- Walsh, C. (1995), ‘Optimal contracts for central bankers’, *American Economic Review* **85**(1), 150–67.
- Walsh, C. (1999), ‘Announcements, Inflation Targeting and Central Bank Incentives’, *Economica* **66**(262), 255–69.
- Walsh, C. (2003a), ‘Accountability, Transparency, and Inflation Targeting’, *Journal of Money, Credit and Banking* **35**(5), 829–49.
- Walsh, C. (2003b), *Monetary Theory and Policy*, the MIT Press.
- Walsh, C. (2003c), ‘Speed Limit Policies : The Output Gap and Optimal Monetary Policy’, *American Economic Review* **91**(3), 265–278.
- Walsh, C. (2006), Transparency, Flexibility and Inflation Targeting, in F. Mishkin & K. Schmidt-Hebbel, eds, ‘Monetary Policy under Inflation Targeting’, Central Bank of Chile.
- Walsh, C. (2007), ‘Optimal Economic Transparency’, *International Journal of Central Banking* **3**(1), 5–36.

- Walsh, C. (2008), 'Announcements and the Role of Policy Guidance', *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* **Jul**, 421–442.
- Walsh, C. (2009), 'Inflation targeting : what have we learned ?', *International Finance* **12**(2), 195–233.
- Walsh, C. (2011), 'The Future of Inflation Targeting', *The Economic Record* **87**(s1), 23–36.
- Wang, G. & Shan, S. (2007), 'Review of Metamodeling Techniques in Support of Engineering Design Optimization', *Journal of Mechanical Design* **129**, 370–381.
- Weber, A. (2007), 'Heterogeneous expectations, learning and European inflation dynamics', Discussion Paper Series 1 : Economic Studies 16, Deutsche Bundesbank, Research Centre.
- White, H. (1992), *Artificial Neural Networks : Approximation and Learning Theory*, Oxford :Blackwell.
- Wieland, V. (2000), 'Monetary policy, parameter uncertainty and optimal learning', *Journal of Monetary Economics* **46**(1).
- Wilenski, U. (1999), NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL., USA.
- Williams, J. (2010), 'Monetary Policy in a Low Inflation Economy with Learning', *FRBSF Economic Review* pp. 1–12.
- Woodford, M. (1996), 'Control of the Public Debt : a Requirement for Price Stability', *NBER Working Paper* **5684**.
- Woodford, M. (2003a), Imperfect common knowledge and the effects of monetary policy, in J. S. P. Aghion, R. Frydman & M. Woodford, eds, 'Knowledge, Information, and Expectations in Modern Macroeconomics : In Honor of Edmund S. Phelps', Princeton University Press.
- Woodford, M. (2003b), *Interest and Prices : Foundations of a Theory of Monetary Policy*, Princeton University Press.
- Woodford, M. (2005), 'Central bank communication and policy effectiveness', *Proceedings, Federal Reserve Bank of Kansas City* (Aug), 399–474.
- Woodford, M. (2008), 'How Important Is Money in the Conduct of Monetary Policy ?', *Journal of Money, Credit and Banking* **40**(8), 1561–1597.
- Ye, K. (1998), 'Orthogonal column latin hypercubes and their application in computer experiments', *Journal of the American Statistical Association* **93**(444), 1430–1439.
- Yıldızoglu, M. (2001), 'Connecting adaptive behaviour and expectations in models of innovation : The Potential Role of Artificial Neural Networks ', *European Journal of Economic and Social Systems* **15**(3), 51–65.
- Yıldızoglu, M. (2002), 'Competing R&D Strategies in an Evolutionary Industry Model', *Computational Economics* **19**(1), 51–65.
- Yıldızoglu, M. (n.d.), Evolutionary approaches of economic dynamics (in french), in M.-C. Belis-Bergouignan, B. Jullien, Y. Lung & M. & Yıldızoglu, eds, 'Industries, innovations, institutions : Eléments de dynamique industrielle', Presses Universitaires de Bordeaux, Pessac, France.

Yıldızoglu, M., Sénegas, M.-A., Salle, I. & Zumpe, M. (2012), ‘Learning the optimal buffer-stock consumption rule of Carroll’, *Macroeconomic Dynamics* . forthcoming.

Yun, T. (1996), ‘Nominal Price Rigidity, Money Supply Endogeneity, and Business Cycles’, *Journal of Monetary Economics* **37**, 345–370.

# Liste des tableaux

3.1	Domaine de variation des facteurs (configurations 1 à 3) . . . . .	116
3.2	Rapport du modèle <i>probit</i> (configuration 1) . . . . .	121
3.3	Listes des variables-réponses . . . . .	134
3.4	Les 5 scenarii d'anticipations d'inflation (configuration 3) . . . . .	151
3.5	Statistiques descriptives (configuration 3) . . . . .	156
3.6	Pertes en bien-être par scenario (configuration 3) . . . . .	164
4.1	Ensemble des 15 paramètres du modèle augmenté des anticipations d'inflation des agents	179
4.2	Politiques monétaires optimales. . . . .	195
4.3	Ensemble des signaux distillés par la banque centrale intégrés au RNA des ménages .	204
4.4	Ensemble des 22 paramètres du modèle augmenté des anticipations par RNA . . . . .	212
4.5	Tests de corrélation de Pearson (109620 observations, <i>p-value</i> entre parenthèses) . . . . .	215
4.6	Analyse de la variance à 4 facteurs, 3780 observations . . . . .	215
4.7	Tests de corrélation de Pearson (14500 observations par degré de transparence, <i>p-value</i> entre parenthèses) . . . . .	228
4.8	Moyenne et écart-types entre parenthèses (14500 observations par degré de transparence). . . . .	228
A.1	Classification de la littérature théorique sur les propriétés du ciblage de l'inflation – 1995/ 2011 . . . . .	247
C.1	Plan d'expériences (configuration 1) . . . . .	268
C.2	Plan d'expériences (configuration 2) . . . . .	269
C.3	Plan d'expériences (configuration 3) . . . . .	269
C.5	Probabilités estimées de viabilité de l'économie (configuration 1) . . . . .	271
C.6	Rapport du modèle MCO par scenario (configuration 3) . . . . .	279
D.1	Plan d'expériences de la configuration (4) – (8 facteurs). . . . .	283
D.2	Plan d'expériences et plan de validation du modèle de krigeage de la configuration (5) – (2 facteurs). . . . .	284
D.3	Plan d'expériences et plan de validation du modèle de krigeage de la configuration (6) – (4 facteurs). . . . .	285
D.4	Configuration 5 (2 paramètres) . . . . .	291
D.5	Configuration 6 (4 paramètres) . . . . .	292
D.6	Statistiques descriptives sur les 109620 observations de chaque variable. . . . .	293
D.7	Statistiques descriptives sur les 109620 observations de chaque variable. . . . .	294
D.8	Statistiques descriptives sur les 109620 observations de chaque variable. . . . .	295



# Liste des illustrations

2.1	Processus de construction du modèle à base d'agents pour l'analyse de politiques monétaires (inspiré de Klügl (2008)) . . . . .	64
2.2	Déroulement du modèle . . . . .	87
2.3	Fonctionnement global du modèle – les flux financiers sont représentés en rouge. . . . .	88
3.1	Taux de chômage dans la configuration (1) – évolution par période . . . . .	119
3.2	Taux de chômage dans la configuration (1) – répartition par expérience . . . . .	119
3.3	Evolution du niveau général des prix dans la configuration (1) . . . . .	120
3.4	Occurrence du plancher zéro du taux d'intérêt nominal sur les 1000 périodes dans la configuration (1) . . . . .	126
3.5	Taux d'intérêt nominal en fonction des coefficients de réaction de la règle de politique monétaire en présence d'un choc de demande négatif (absence d'arbitrage) : taux de chômage $u = 10\%$ et écart d'inflation $(\pi - \pi^T) = -2\%$ . . . . .	127
3.6	Taux d'intérêt nominal en fonction des coefficients de réaction de la règle de politique monétaire en présence d'un choc d'offre (arbitrage) ; taux de chômage $u = 10\%$ et écart d'inflation $(\pi - \pi^T) = +2\%$ . . . . .	127
3.7	Valeur espérée de la variable <i>sustEco</i> dans l'échantillon total de la configuration (2) – 1300 observations . . . . .	131
3.8	Répartition par expérience des performances macroéconomiques et des stratégies (configuration 2) . . . . .	135
3.9	Répartition par expérience des performances macroéconomiques et des stratégies (configuration 2) . . . . .	136
3.10	Evolutions des détentions réelles moyennes des ménages (configuration 2) . . . . .	137
3.11	Evolution de l'écart de bien-être (configuration 2) . . . . .	138
3.12	Valeur espérée de l'écart d'inflation (configuration 2) . . . . .	140
3.13	Ecart d'inflation en fonction de la valeur de la cible (configuration 2) . . . . .	141
3.14	Tests de corrélation entre les objectifs selon <i>alpha</i> (configuration 2) . . . . .	142
3.15	Taux d'intérêt réel en fonction de la cible (configuration 2) . . . . .	143
3.16	Ratios de consommation et d'endettement en fonction de la cible (configuration 2) . . . . .	144
3.17	Tests de corrélation entre les stratégies et les performances macroéconomiques (configuration 2) . . . . .	146
3.18	Taux d'intérêt réel et consommation en fonction de la réaction à l'inflation (configuration 2) . . . . .	149
3.19	Dynamique du modèle dans les scenarii 1 et 5 dans l'expérience 8 parmi l'ensemble des 20 réplications. . . . .	157
3.20	Signes des dérivées estimées (basés sur les coefficients estimés significatifs à 10%, de la régression quadratique, cf. tableau C.6) de $(\pi - \pi^T)^2$ et $u^2$ par rapport à $\phi_\pi$ et $\phi_u$ . . . . .	158
4.1	Illustration du mécanisme de formation des anticipations d'inflation des ménages dans le cas d'un régime de ciblage de l'inflation . . . . .	175

4.2	Illustration du mécanisme de formation des anticipations d'inflation des ménages dans le cas d'un régime de non-ciblage de l'inflation . . . . .	177
4.3	Arbre de régression de la perte de la banque centrale (configuration 4) . . . . .	181
4.4	Dynamique macroéconomique dans les expériences 16 et 30 (configuration 4) . . . . .	183
4.5	Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la banque centrale, $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.05\}$ et $\pi^T = 2\%$ . . . . .	188
4.6	Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la banque centrale, $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.4\}$ et $\pi^T = 2\%$ . . . . .	190
4.7	Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la banque centrale, $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$ et $\pi^T = 2\%$ . . . . .	191
4.8	Fonctionnement dynamique du modèle mental de chaque agent (Yıldizoğlu (2001)) . .	199
4.9	Fonctionnement du modèle mental de chaque agent. . . . .	206
4.10	Effets marginaux significatifs de l'ANOVA. . . . .	217
4.11	Illustration : niveau de choc 1 ( $\{\sigma_{mutK}, \sigma_{mutW}\} = \{0.05, 0.4\}$ ), $commRate = 1$ , médiane et écart-type sur 20 réplications. . . . .	219
4.12	Valeur de la fonction de perte et politique monétaire optimale, $\pi^T = 0.02$ et $horizon = 4$ . . . . .	224
4.13	Frontières efficientes estimées selon le degré de transparence de la banque centrale (de 0 à 6) . . . . .	225
4.14	Relations de corrélation entre la politique de transparence de la banque centrale, les stratégies et anticipations des ménages et les performances macroéconomiques dans le modèle. . . . .	227
4.15	Sensibilité des résultats à la valeur de la cible et de l'horizon des prévisions de la banque centrale . . . . .	230
B.1	Exemples de plan d'expérience (trois facteurs et 8 points, source : Goupy & Creighton (2007)) . . . . .	254
B.2	Un carré latin à trois facteurs pouvant prendre chacun trois valeurs (source : Goupy & Creighton (2007)) . . . . .	255
B.3	Principe de division de l'espace expérimental, cas à deux dimensions (Goupy & Creighton (2007)) . . . . .	256
B.4	Principe de division de l'espace expérimental, cas à trois dimensions (Goupy & Creighton (2007)) . . . . .	256
B.5	Comportement du métamodèle obtenu par kriging ordinaire (source : Jourdan (2005))	259
B.6	Interprétation d'une boîte à moustaches . . . . .	262
C.1	Rapport du modèle de krigeage (configuration 2) . . . . .	274
C.2	Rapport du modèle de krigeage (configuration 2) . . . . .	275
C.3	Rapport du modèle de krigeage (configuration 2) . . . . .	276
C.4	Rapport du modèle de krigeage (configuration 2) . . . . .	277
C.5	Evolution du bien-être agrégé dans les 5 scenarii (configuration 3) . . . . .	278
D.1	Variance de la fonction de perte et de la distance moyenne à l'utilité potentielle en fonction du nombre de réplications de la configuration 5. . . . .	284
D.2	Moyenne des anticipations d'inflation parmi les ménages en régime de ciblage de l'inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	286
D.3	Variance des anticipations d'inflation parmi les ménages en régime de ciblage de l'inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	286
D.4	Crédibilité de la Banque centrale en régime de ciblage de l'inflation en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	286

---

D.5	Taux d'inflation en régime de ciblage de l'inflation en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	286
D.6	Moyenne des anticipations d'inflation parmi les ménages en régime de non-ciblage de l'inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	287
D.7	Variance des anticipations d'inflation parmi les ménages en régime de non-ciblage de l'inflation (IT/CI) en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	287
D.8	Crédibilité de la Banque centrale en régime de non-ciblage de l'inflation en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	287
D.9	Taux d'inflation en régime de non-ciblage de l'inflation en fonction de la largeur de la fourchette . . . . .	287
D.10	Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la Banque centrale, $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.05, 0.4\}$ et $\pi^T = 4\%$ . . . . .	288
D.11	Estimation par krigeage de la valeur de la fonction de perte de la Banque centrale, $\{\sigma_{mutW}, \sigma_{mutK}\} = \{0.4, 0.05\}$ et $\pi^T = 1\%$ . . . . .	289



# Liste des encadrés

2.1	Principales techniques de vérification et de validation utilisées dans la thèse . . . . .	66
2.2	Choix des algorithmes génétiques et justification des restrictions sur l'offre de travail et le nombre de firmes . . . . .	90
2.3	Traitements des dynamiques explosives de l'endettement et de l'épargne des ménages .	95
3.1	Résumé du fonctionnement du modèle (cf. section III du 2) . . . . .	118
4.1	Métamodélisation par krigage – application . . . . .	185
4.2	Apprentissage d'un réseau de neurones par rétropropagation des erreurs ( <i>backpropagation</i> ) . . . . .	208



# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Ciblage de l’Inflation, Transparence et Anticipations</b>	<b>11</b>
Introduction . . . . .	13
I Le ciblage de l’inflation : une règle ? . . . . .	15
II Pourquoi et comment la transparence induit des effets économiques . . . . .	21
III Transparence, asymétrie d’informations et ciblage de l’inflation . . . . .	24
III.1 Coordonner les anticipations d’inflation par l’annonce d’une cible . . . . .	25
III.2 Réduire l’incertitude par la publication des prévisions de la banque centrale .	28
IV La transparence dans un contexte d’apprentissage . . . . .	36
IV.1 Faciliter l’apprentissage des agents grâce à un régime de ciblage de l’inflation	36
IV.2 Le ciblage de l’inflation comme une routine . . . . .	40
Conclusion . . . . .	44
<b>2 Construction du Modèle à Base d’Agents</b>	<b>47</b>
Introduction . . . . .	49
I Vue d’ensemble de la modélisation à base d’agents en économie . . . . .	53
I.1 L’économie à base d’agents : l’économie comme un système complexe adaptatif	53
I.2 Pourquoi une économie à base d’agents pour modéliser un régime de ciblage de l’inflation ? . . . . .	57
I.2.1 Dynamiques non-linéaires et déséquilibre . . . . .	58
I.2.2 Apprentissage et comportements adaptatifs . . . . .	59
I.2.3 Hétérogénéité et agrégation . . . . .	60
I.3 Les résultats des modèles à base d’agents peuvent-ils être considérés comme robustes ? . . . . .	61
I.3.1 Interrogations autour des résultats des modèles économiques à base d’agents . . . . .	61
I.3.2 Comment garantir la robustesse d’un modèle à base d’agents ? . . . . .	63
II Le socle de départ : le modèle Nouveau Keynésien de base . . . . .	68
II.1 Comportement des ménages . . . . .	69
II.2 Comportement des firmes . . . . .	74
II.2.1 Tarification optimale en environnement de prix flexibles . . . . .	75
II.2.2 Tarification optimale en environnement de prix rigides . . . . .	76
II.3 Comportement des autorités monétaires . . . . .	77
II.4 Equilibres . . . . .	78
II.4.1 Marché du travail . . . . .	78
II.4.2 Marchés des biens . . . . .	78
II.4.3 Equilibres en anticipations rationnelles . . . . .	79
II.5 Chocs et ajustements . . . . .	80
III Elaboration du modèle conceptuel . . . . .	85

III.1	Comportement des ménages . . . . .	87
III.2	Comportement de la firme . . . . .	98
III.3	Comportement des autorités monétaires . . . . .	101
III.4	Agrégation et rationnement des marchés . . . . .	102
III.5	Chocs et ajustements . . . . .	104
Conclusion	. . . . .	109
<b>3</b>	<b>Le Ciblage de l’Inflation dans une Economie sous Apprentissage</b>	<b>111</b>
Introduction	. . . . .	113
I	Analyse préalable . . . . .	115
I.1	Paramétrage . . . . .	115
I.2	Description du phénomène de "spirale dépressive" de l'économie . . . . .	117
I.3	Mise en évidence des origines du phénomène de "spirale dépressive" . . . . .	120
I.3.1	Convergence de la demande de travail vers zéro . . . . .	121
I.3.2	Chute de la demande de bien . . . . .	123
I.3.3	Limites de l'action de la banque centrale . . . . .	125
I.4	Solution apportée au problème de "spirale dépressive" de l'économie . . . . .	128
II	Analyse de sensibilité . . . . .	130
II.1	Caractérisation des variables-réponses . . . . .	131
II.1.1	Liste des variables-réponses . . . . .	132
II.1.2	Statistiques descriptives des variables-réponses . . . . .	132
II.2	Impact des facteurs sur les variables macroéconomiques du modèle . . . . .	139
II.2.1	Déterminants de l'écart de l'inflation à sa cible (en valeur absolue) .	139
II.2.2	Déterminants du taux de chômage . . . . .	141
II.3	Impact des paramètres sur les stratégies des ménages . . . . .	145
II.3.1	Déterminants du comportement moyen d'indexation du salaire nominal désiré sur l'inflation anticipée (moyenne des coefficients $\gamma^w$ ) .	145
II.3.2	Déterminants du comportement moyen de réaction du taux de consommation au taux d'intérêt réel (moyenne des coefficients $\gamma^k$ ) . . . . .	147
III	Effets des anticipations sur la dynamique du modèle . . . . .	150
III.1	Protocole de simulation (configuration 3) . . . . .	151
III.1.1	Différents scenarii d'anticipations d'inflation des ménages . . . . .	151
III.1.2	Protocole de simulation et exploitation des résultats . . . . .	153
III.2	Le cas de référence : une cible de l'inflation parfaitement claire et crédible .	154
III.3	Conséquences d'une cible d'inflation bruitée . . . . .	159
III.4	Conséquences d'un manque de crédibilité de la cible d'inflation . . . . .	162
Conclusion	. . . . .	165
<b>4</b>	<b>Dynamique des anticipations, apprentissage et ciblage</b>	<b>167</b>
Introduction	. . . . .	169
I	La cible d'inflation comme un point focal . . . . .	170
I.1	Intégrer la cible dans le mécanisme d'anticipation d'inflation . . . . .	171
I.1.1	Anticiper l'inflation en régime de ciblage de l'inflation . . . . .	173
I.1.2	Anticiper l'inflation sans la connaissance de la cible (régime de non-ciblage) . . . . .	175
I.2	Ciblage <i>versus</i> non-ciblage de l'inflation : performances comparées . . . . .	177
I.2.1	Résultats préliminaires . . . . .	178
I.2.2	Volatilité de l'environnement et politique monétaire optimale . . . . .	184
I.3	Résultats complémentaires : différents degrés de transparence de la cible . . . . .	193
II	La communication dans le modèle mental des agents . . . . .	198

II.1	L'apprentissage par un modèle mental . . . . .	198
II.2	L'intégration des réseaux de neurones au modèle minimal . . . . .	201
II.2.1	Informations du RNA et transparence de la banque centrale . . . . .	202
II.2.2	Fonctionnement du RNA . . . . .	206
II.3	Transparence et performances macroéconomiques . . . . .	210
II.3.1	Analyse à politique monétaire fixée (configuration 7) . . . . .	210
II.3.2	Transparence et politique monétaire optimale . . . . .	220
Conclusion	. . . . .	232
<b>Conclusion générale</b>		<b>235</b>
<b>A Annexes au chapitre 1</b>		<b>239</b>
I	Le ciblage de l'inflation comme parade au biais inflationniste : modélisation . . . . .	241
I.1	Le problème du biais inflationniste . . . . .	241
I.2	L'annonce de la cible comme parade au biais inflationniste : modélisation . . . . .	243
I.3	La transparence sur les prévisions de la banque centrale comme parade au biais inflationniste : modélisation . . . . .	244
<b>B Annexes au chapitre 2</b>		<b>249</b>
I	Pseudo-code du modèle computationnel . . . . .	251
II	Grille de lecture des outils d'analyse utilisés . . . . .	252
II.1	La méthode des plans d'expérience . . . . .	252
II.1.1	Motivation . . . . .	252
II.1.2	Définitions préalables . . . . .	253
II.1.3	Propriétés du plan recherchées . . . . .	253
II.1.4	Les hypercubes latins presque orthogonaux . . . . .	255
II.2	L'estimation d'un métamodèle par interpolation linéaire : le <i>kriging</i> (ou krigeage) . . . . .	257
II.2.1	Principe . . . . .	257
II.2.2	Le kriging simple ou ordinaire : cas où le processus $\mu(x)$ est une constante . . . . .	258
II.2.3	Le kriging universel : cas où le processus $\mu(x)$ est une tendance quelconque . . . . .	258
II.2.4	Spécification de la covariance $C$ . . . . .	259
II.2.5	Cas des simulations non-déterministes . . . . .	260
II.2.6	Estimer la qualité du métamodèle . . . . .	260
II.3	Autres outils d'analyse . . . . .	262
II.3.1	Boîtes à moustaches ("boxplot") . . . . .	262
II.3.2	Arbres de régression . . . . .	262
<b>C Annexes au chapitre 3</b>		<b>265</b>
I	Plans d'expérience utilisés . . . . .	267
II	Probabilités estimées de viabilité de l'économie (modèle <i>probit</i> , configuration (1)) . . . . .	270
III	Rapports des modèles de krigeage (analyse de sensibilité, configuration (2)) . . . . .	272
IV	Résultats complémentaires (config. 3) . . . . .	278
<b>D Annexes au chapitre 4</b>		<b>281</b>
I	Plans d'expériences utilisés . . . . .	283
II	Rôle de la fourchette (configuration 4) . . . . .	286
III	Résultats complémentaires (config. 5) . . . . .	288
III.1	Sensibilité à la valeur de la cible d'inflation $\pi^T$ . . . . .	288

III.2	Rapports des modèles de krigage . . . . .	290
IV	Résultats complémentaires (config. 7) . . . . .	293
<b>Bibliographie</b>		<b>297</b>
<b>Liste des tableaux</b>		<b>315</b>
<b>Liste des illustrations</b>		<b>317</b>
<b>Liste des encadrés</b>		<b>321</b>
<b>Table des matières</b>		<b>323</b>

### **Colophon**

Le document final comporte 327 pages dont 256 pour le texte principal. La bibliographie contient 294 références.

Citation : ISABELLE SALLE (2012), *Apprentissage, Hétérogénéité et Politique Monétaire : Application aux Régimes de Ciblage de l'Inflation*, Thèse de doctorat, Université Montesquieu-Bordeaux IV. 327 pages.

---

