



HAL
open science

La modélisation multi-agent du marché du travail français

Olivier Goudet

► **To cite this version:**

Olivier Goudet. La modélisation multi-agent du marché du travail français. Modélisation et simulation. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2015. Français. NNT : 2015PA066631 . tel-01343302

HAL Id: tel-01343302

<https://theses.hal.science/tel-01343302v1>

Submitted on 7 Jul 2017

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

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

**THÈSE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité

Informatique

École Doctorale Informatique, Télécommunications et Électronique (Paris)

Présentée par

Olivier Goudet

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

La modélisation multi-agent du marché du travail français

devant le jury composé de :

M. Nicolas SABOURET	Directeur de thèse
M. Jean-Daniel KANT	Encadrant de thèse
M. Philippe MATHIEU	Rapporteur
M. François LEGENDRE	Rapporteur
Mme Amal EL FALLAH SEGHROUCHNI	Examineur
M. Philippe CAILLOU	Examineur
M. Gérard BALLOT	Invité

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier les membres du jury, François Legendre et Philippe Mathieu, rapporteurs de cette thèse, pour la pertinence de leurs remarques ; Nicolas Sabouret, qui m'a fait l'honneur d'accepter la direction de cette thèse ; ainsi que Philippe Caillou pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail. Je remercie aussi Amal El Fallah Seghrouchni pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe des Systèmes Multi-Agents du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 et pour avoir accepté de siéger dans mon jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadrant, Jean-Daniel Kant, qui s'est toujours montré disponible tout au long de ce travail. Ses encouragements et ses précieux conseils m'ont été d'un très grand profit pour mener à bien cette thèse.

Je souhaite aussi remercier vivement Gérard Ballot pour son implication tout au long de ma thèse. Sa rigueur scientifique ainsi que son expérience m'ont beaucoup apporté.

Je tiens à remercier les membres de l'équipe des Systèmes Multi-Agents du Laboratoire d'Informatique de Paris 6, Nicolas Maudet, Aurélie Beynier, Zahia Guessoum, Vincent Corruble et Cédric Herpson pour les échanges scientifiques que nous avons eu.

J'exprime toute ma gratitude aux coordinateurs, Jean-Daniel Zucker, Edith Perrier et Christophe Cambier, du "Programme Doctoral International « Modélisation des Systèmes Complexes » de l'Institut pour la Recherche et le Développement, qui a financé cette thèse.

Mes remerciements vont ensuite aux chercheurs Diaraf Seck, Pierre Mendy et Alassane Bah pour l'organisation de mon programme académique qui a eu lieu à Dakar dans le cadre de ma thèse. Je les remercie pour les échanges enrichissants que nous avons eu, ainsi que pour leur chaleureux accueil à l'université.

Je souhaite remercier aussi les ingénieurs de recherche Christophe Boudier, Jean-Pierre Arranz, Vincent Cuzin et Benoît Gayat pour leurs conseils techniques qui ont facilité l'avancement de mon travail. Je remercie aussi Anne Quezel pour l'organisation de mes missions scientifiques.

Je remercie les autres doctorants de l'équipe, Kevin Chapuis, Emmanuel Hadoux, Kei Brousmiche, Costin Caval, Thomas Huraux et Evrard Mathieu, pour l'ambiance de travail à la fois studieuse et chaleureuse.

Je souhaite remercier mes parents et mes soeurs, Antoine, Catherine, Flore et Anna Goudet, et en particulier ma grand-mère, Monique Goudet, qui a travaillé dans un laboratoire de Jussieu et dont le témoignage enthousiaste m'a donné très tôt l'envie et le goût pour la recherche.

Enfin, un grand merci à mes amis et particulièrement à ma conjointe, Gaelle Rolland, qui ont supporté mes humeurs, notamment au cours de ces derniers mois, et qui m'ont apporté tout leur soutien.

Résumé

Cette thèse présente un modèle multi-agent du marché du travail. Le modèle reproduit le fonctionnement du marché tant au niveau agrégé, qu'au niveau des principales catégories de main-d'œuvre, sur la base des décisions d'agents hétérogènes, entreprises et individus, qui interagissent. Les décisions reposent sur des calculs de profits et d'utilités et se font dans un contexte de rationalité limitée. La structure théorique sous-jacente sur laquelle repose les mécanismes décisionnels est le concept de *recherche*. Nous appliquons ce cadre de modélisation pour étudier le marché du travail français en 2011. Le modèle est à l'échelle de 1/4700. Il est très détaillé au niveau des institutions du marché du travail qui ont une influence sur les décisions des agents. Le modèle est ensuite calibré par un algorithme puissant de façon à reproduire un grand nombre de cibles importantes du marché du travail. Le modèle ainsi calibré permet de faire émerger une comptabilité cohérente des flux bruts des individus entre les principaux états : emploi (avec la distinction CDD et CDI), chômage et inactivité. La simulation des flux permet de faire émerger différents schémas de mobilité et de caractériser la nature du marché du travail. Nous reproduisons la part importante de contrats à durée déterminée parmi les embauches et nous mettons en évidence la dualité du marché du travail français. La prise en compte des effets d'éviction de certaines catégories d'agents (les jeunes par exemple) par d'autres catégories d'agent est un des apports du modèle pour l'analyse du marché du travail. Nous avons enfin étudié une série de politiques économiques suivant différents indicateurs. Nous montrons qu'il est difficile de trouver une politique publique qui donne de bons résultats pour tous les critères et qui est bénéfique à la fois pour toutes les entreprises et tous les individus. Tout est affaire de compromis et de choix politique.

Abstract

This thesis presents an agent-based model of the labor market. The model simulates the market at the aggregate level and at the level of the principal manpower categories, on the basis of the decisions of heterogeneous agents, firms and individuals, who interact. These decisions rely on computations of profits and utilities in a context of bounded rationality. The theoretical structure that underlies the decisions is the search concept. We apply this framework to the case of France in 2011. The model is at a scale of 1/4700. It is fairly detailed on the institutions of the labor market which constrain the agents' decisions. Subsequently, it is calibrated by a powerful algorithm to reproduce a large number of variables of interest. The calibrated model presents a coherent accounting system of the gross flows of the individuals between the main states, employment, distinguishing open ended contracts and fixed duration contracts, unemployment and inactivity. The simulation of the gross flows enables us to analyse the patterns of mobility and to characterize the nature of the labor market under study, reproducing the high proportion of the fixed duration contracts in the hiring flows, and it points to a dualism of the French labor market. Modeling crowding out of some categories of workers (for instance the youths) by others is then a main contribution of the model to the labor market analysis. Finally, we study economic policies according to various indicators. We show that it is difficult to find a public policy which provides good results for all criteria and which is beneficial both for firms and individuals. It is all a question of compromise and political choice.

Table des matières

Introduction	11
1 État de l'art	18
1.1 La théorie de la recherche	18
1.2 Les modèles de recherche analytiques	19
1.2.1 Le modèle de recherche partiel	20
1.2.2 Le modèle de recherche avec fonction d'appariement	23
1.2.3 Le modèle d'appariement avec deux contrats	26
1.2.4 Bilan des modèles de recherche analytiques	28
1.3 Les modèles multi-agents du marché du travail	31
1.3.1 Les modèles multi-agents "normatifs" ou "abstraites" du marché du travail	32
1.3.2 Les modèles multi-agents du marché du travail intégrés dans un modèle macroéconomique	36
1.3.3 Les modèles détaillés et calibrés du marché du travail	38
2 Worksim : un modèle multi-agent du marché du travail français	42
2.1 Le cadre économique général du modèle WorkSim	43
2.2 La structure générale du modèle informatique	44
2.3 Modélisation des agents "individu" et "entreprise privée" dans WorkSim	46
2.3.1 Modélisation d'un agent "individu"	46
2.3.2 Modélisation d'un agent "entreprise privée"	53
2.3.3 Modélisation d'un poste de l'entreprise	60
2.3.4 Modélisation du poste de dirigeant	67
2.4 L'environnement	67
2.4.1 Le module institutionnel	68
2.4.2 JobAds	70
2.4.3 L'institut de statistiques	71
2.4.4 L'État	71
2.5 Les modèles cognitifs et les décisions des agents "individu" et "entreprise privée"	72
2.5.1 Le modèle cognitif des agents "individu"	72
2.5.2 Le modèle cognitif des agents "entreprise privée"	76
2.6 Le cycle de la simulation et les décisions des agents	83
2.6.1 Phase A - Étape 1 : Création de nouveaux postes et de nouveaux contrats	83
2.6.2 Phase A - Étape 2 : Destruction de postes vacants	88

2.6.3	Phase A - Étape 3 : Gestion des salariés	89
2.6.4	Phase A - Étape 4 : Licenciements et faillite	92
2.6.5	Phase B - Étapes 5 : Décisions des individus de changer d'état	93
2.6.6	Phase C - Étape 8 et 9 : Processus de recrutement et promotions	103
2.6.7	Phase D - Étape 9-13 : Le module démographique	104
2.7	Bilan du chapitre	105
3	Conception et implémentation du modèle informatique WorkSim	107
3.1	Conception de la plateforme de simulation	107
3.1.1	Structure du modèle informatique	108
3.1.2	Architecture des agents du modèle	109
3.1.3	Les agents "individu"	109
3.1.4	Les agents "entreprise privée"	110
3.1.5	Diagramme des interactions entre les agents	111
3.1.6	La gestion du temps dans WorkSim	112
3.1.7	L'aléatoire dans le modèle	113
3.2	Lancement des simulations	114
3.2.1	Lancement en mode <i>batch</i>	115
3.2.2	Interface graphique	115
3.3	Bilan	117
4	Initialisation et calibration du modèle	118
4.1	Mise à l'échelle du modèle et initialisation des agents	118
4.1.1	Mise à l'échelle des entreprises	118
4.1.2	Mise à l'échelle des individus	119
4.1.3	Initialisation des agents	119
4.2	Calibration du modèle	121
4.2.1	Les objectifs de la calibration	122
4.2.2	Choix de la méthode de calibration	123
4.2.3	Le choix de l'algorithme d'optimisation	125
4.2.4	Protocole de calibration	127
4.2.5	Résultats de la calibration	129
4.3	Bilan du chapitre	136
5	Analyses du modèle	137
5.1	Les flux du marché du travail français	137
5.1.1	Comparaison avec les DMMO	137
5.1.2	Comparaison des taux de transitions annuelles avec l'enquête emploi	139
5.2	Diagramme de transitions des individus sur le marché du travail	140
5.2.1	Analyse globale	140
5.2.2	Analyse par tranche d'âge	142
5.2.3	Analyse par niveau de qualification	146
5.3	Analyse du chômage	146
5.3.1	Le chômage de long terme	146

5.3.2	Les raisons du chômage	146
5.4	Analyse de sensibilité des principaux paramètres du modèle	148
5.4.1	Analyse de paramètres relatifs aux comportements des agents "individu"	148
5.4.2	Analyse de paramètres relatifs aux comportements des agents "entreprise privée"	152
5.4.3	Réponse du modèle à des chocs agrégés	158
5.5	Bilan du chapitre	164
6	Évaluation de politiques publiques	166
6.1	Le contrat de génération	166
6.2	Évaluations de politiques publiques avec le nouveau modèle	168
6.2.1	Effets des politiques d'allègements de charges patronales	169
6.2.2	Ciblage sur les bas salaires des allègements de charges	171
6.2.3	Réduction du temps de travail	173
6.2.4	Étude de politiques des contrats	177
6.3	Bilan du chapitre	187
7	Conclusion et perspectives	190
7.1	Bilan général	190
7.1.1	Le modèle multi-agent WorkSim	190
7.1.2	Résultats du modèle	191
7.2	Apports de notre travail	192
7.2.1	Apports de l'approche multi-agent pour la modélisation du marché du travail	192
7.2.2	Apports pour les systèmes multi-agents	194
7.2.3	Apports pour la méthodologie de calibration d'une simulation multi-agent	194
7.3	Limites et perspectives	195
7.3.1	Limites de la méthode de calibration	195
7.3.2	Améliorer l'analyse du modèle	197
7.3.3	Compléter le modèle	198
7.4	Extensions	200
	Bibliographie	209
	Annexes	210
	Annexe A : le niveau des salaires, des charges et des allocations de référence	210
	Annexe B : Estimation des coefficients d'évolution de la demande de l'entreprise	214
	Annexe C : Calcul du profit pour un contrat	214
	Annexe D : Implémentation des contrats CDD et CDI	220
	Annexe E : Module démographique	225
	Annexe F : Les paramètres fixés du modèle	228
	Annexe G : Choix de l'algorithme de calibration	230
	Annexe H : Diagrammes de flux par niveau de qualification	233
	Annexe I : Évaluation du contrat de génération	236

TABLE DES MATIÈRES

Annexe J : Propositions pour appliquer WorkSim au Sénégal	247
Glossaire	257

Introduction

Cette thèse porte sur la simulation multi-agent afin de modéliser un système complexe. D'après (Le Moigne, 1990), "un système complexe est, par définition, un système que l'on tient pour irréductible à un modèle fini, aussi compliqué, stochastique, sophistiqué que soit ce modèle, quelque soit sa taille, le nombre de ses composants, l'intensité de leurs interactions". De plus, il y existe généralement dans ce système de nombreuses boucles de rétroaction : les comportements collectifs et les propriétés qui émergent au niveau macroscopique peuvent modifier les comportements des entités au niveau microscopique (Lesne, 2009). Le fonctionnement du système est une globalité irréductible, qu'il est impossible de représenter complètement avec un ensemble d'équations solvables et prédictives. Pour comprendre son fonctionnement, il est nécessaire de tout prendre en compte, ce qui amène à réaliser une simulation.

L'usage de la simulation informatique multi-agent se développe depuis une trentaine d'années : "la complexité du monde réel est reproduite dans des expérimentations *in silico*, où l'on observe les dynamiques individuelles et collectives d'entités informatiques, des « abstractions manipulables » du monde réel, conçues par des chercheurs de toutes disciplines" (Treuil *et al.*, 2008). Cette simulation informatique peut être réalisée en utilisant un Système Multi-agent (SMA), qui peut être défini comme une organisation d'agents (El Fallah Seghrouchni et Briot, 2009). Chaque agent de ce système est "une entité réelle ou virtuelle, dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement, qu'il est capable de percevoir, sur lequel il est capable d'agir et d'interagir avec les autres agents" (Demazeau et Costa, 1996). Un SMA permet ainsi la représentation précise de l'ensemble des entités qui composent le système complexe. Il permet de spécifier l'environnement dans lequel elles évoluent, ainsi que les règles d'interactions entre ces entités. Par interaction, on entend la mise en relation dynamique de deux ou plusieurs entités par le biais d'un ensemble d'actions réciproques (El Fallah Seghrouchni et Briot, 2009).

Nous avons choisi d'utiliser cette technologie des SMA pour étudier les sciences humaines et sociales, et plus particulièrement, dans la discipline des sciences économiques pour modéliser le marché du travail français. Le marché du travail peut être vu comme un système complexe, dans le sens où il met en jeu un grand nombre d'interactions locales, entre des "travailleurs" et des "employeurs". A cette complexité, qui provient du grand nombre d'interactions, s'ajoute un degré de complexité supplémentaire inhérente aux sciences humaines et sociales, car il s'agit de modéliser les comportements humains (Kant, 2012).

Notre problématique

La problématique de cette thèse est la suivante : en quoi une modélisation avec un système multi-agent et la théorie des *systèmes complexes* peuvent-elles aider à comprendre le fonctionnement du marché du travail ? Pour répondre à cette question, notre approche est pluridisciplinaire. Elle allie à la fois l'informatique, avec l'intelligence artificielle et les systèmes multi-agents, et l'économie du travail. Ce projet pose aussi des questions liées à la psychologie et à la sociologie pour modéliser les comportements des individus. Comment en effet représenter les comportements des agents sur le marché du travail de façon réaliste ? Sur quelles données ou théories s'appuyer ?

Une fois les comportements et les mécanismes d'interaction spécifiés, un autre enjeu est celui de la calibration et de la validation du modèle. Nous verrons que notre modèle est caractérisé par un grand nombre de paramètres qui déterminent conjointement les dynamiques de la simulation. Sur quelles techniques s'appuyer pour déterminer ces paramètres ? Comment confronter le modèle aux données réelles pour le valider ?

Il faut ensuite analyser une simulation multi-agent. Le paradigme SMA a pour avantage de pouvoir analyser au niveau local les interactions et les comportements qui produisent des résultats au niveau agrégé. Les potentialités de cette approche pour l'analyse explicative du marché du travail sont donc nombreuses. Mais quels outils sont à mettre en œuvre pour exploiter ces possibilités ?

Une fois le modèle analysé, une dernière question se pose : quelles solutions proposer pour améliorer le fonctionnement du marché du travail ? Il faudra tout d'abord définir des critères qui permettent de préciser ce qu'on entend par "améliorer son fonctionnement".

Application au marché du travail français

Notre cas d'étude dans cette thèse est l'analyse sur marché du travail français en 2011. Nous avons choisi cette année, car c'est l'année la plus récente pour laquelle un grand nombre de données statistiques sont disponibles.

Pourquoi s'intéresser au marché du travail français ?

Depuis plus de 30 ans, la France est confrontée à un chômage de masse. D'un côté, l'offre de travail a augmenté, à cause d'une modification profonde de la société française avec notamment l'arrivée des femmes sur le marché du travail et le recul de l'âge de départ à la retraite. De l'autre, la demande de travail a diminué dans certains secteurs, notamment pour les emplois peu qualifiés, grâce à la mécanisation et l'informatisation, ainsi que la concurrence de la main-d'œuvre étrangère. Les mesures mises en place par les gouvernements successifs n'ont pas réussi à réduire de manière significative le chômage. De surcroît, la crise financière mondiale de 2007 à 2010 a ralenti la croissance économique, ce qui a brutalement aggravé une situation de l'emploi déjà difficile. Après la crise, la France n'a toujours pas réussi véritablement à renouer avec l'emploi, alors que la situation s'est améliorée pour d'autres pays européens. Ainsi, dans le rapport 2015 de l'OCDE sur les perspectives de l'emploi, il est mentionné que "la France reste confrontée à un taux de chômage élevé et persistant,

atteignant 10.3% de la population active au premier trimestre de 2015. À titre de comparaison, au cours des deux dernières années, le chômage a diminué de manière continue dans la zone OCDE, atteignant 7.0% au premier trimestre de 2015." La question du chômage est au cœur des préoccupations actuelles des français. D'après un récent sondage (IFOP, 2015), en janvier 2015, pour 73% d'entre eux la lutte contre le chômage est un sujet "tout à fait prioritaire". En effet, les enjeux liés au chômage sont nombreux et variés :

— Il y a tout d'abord des *enjeux sociaux*.

L'emploi permet à l'individu de trouver sa place dans la société. La perte prolongée d'un emploi a donc des conséquences graves sur la vie sociale. Elle peut conduire à l'isolement, voir à l'exclusion. La précarité affecte particulièrement les jeunes qui éprouvent alors des difficultés pour accéder au crédit et au logement.

Le chômage a aussi des conséquences sur la santé. En effet, (Jin *et al.*, 1995) montre que le taux de mortalité des chômeurs suite à une maladie augmente de 75% par rapport à celui des individus en emploi.

— Il y a ensuite des *enjeux économiques*.

En effet, le chômage a pour conséquence de diminuer le revenu des ménages et la consommation, ce qui a un impact sur la croissance. De plus, le chômage représente un coût direct pour l'État, avec les allocations chômage et les minima sociaux, auxquels s'ajoutent une diminution des rentrées de cotisations patronales et d'impôts. Mais il représente aussi un coût indirect lié par exemple au coût de la formation des chômeurs ou à l'augmentation des dépenses de santé.

Ces coûts contribuent à creuser le déficit budgétaire et la dette publique.

— Il y a aussi des *enjeux politiques*.

En effet, le chômage est devenu un thème récurrent dans les campagnes politiques et conditionne les résultats des élections. A titre d'exemple, en juillet 2015, Le président Hollande annonce : «S'il n'y a pas de baisse du chômage, je ne me représenterai pas».

Le chômage est donc sujet primordial et plus que jamais d'actualité. Pour l'expliquer, cela implique de comprendre les spécificités du marché du travail français.

Les spécificités du marché du travail français

Le marché du travail est le lieu de rencontre entre les employeurs et les travailleurs. En France, cette rencontre est formalisée par un contrat encadré par le droit du travail. Deux principaux contrats peuvent être conclus entre l'employeur et le salarié :

— le contrat à durée indéterminée (CDI) qui ne prévoit pas la date à laquelle le contrat prendra fin. Il peut être résilié soit par l'employeur, qui peut licencier pour raisons personnelles ou économiques, soit par le salarié, qui peut démissionner.

— le contrat à durée déterminée (CDD) qui est conclu pour une durée limitée et précisée au moment de la signature du contrat.

Le marché du travail français est caractérisé par une forte dualité entre un secteur protégé avec des travailleurs en CDI et un secteur précaire avec des travailleurs alternant des périodes de chômage et des épisodes de CDD. En France, en 2011, seulement 10% des individus sont

en CDD, mais les CDD représentent environ 80% des embauches. De plus, le nombre de CDD de très courte durée a considérablement augmenté depuis 2003 (à titre d'exemple, le nombre de CDD d'une durée inférieure ou égale à une semaine a augmenté de 120% sur la période 2000-2010 (ACOSS, 2011)). Le taux de rotation¹ de la main-d'œuvre résultant de cet usage massif de contrats courts est susceptible d'avoir des effets négatifs sur le fonctionnement du marché du travail.

Pour les chercheurs et les décideurs politiques se pose alors la question suivante : *comment réformer le droit du travail pour améliorer la situation de l'emploi* ? Et plus particulièrement, se pose la question délicate des contrats : comment concilier la flexibilité du travail et la sécurité de l'emploi ?

La modélisation du marché du travail

Pour analyser le marché du travail et répondre à ces questions, la démarche scientifique consiste à construire et à utiliser un modèle qui est une représentation simplifiée de la réalité pour montrer les aspects importants du système étudié (OQLF, 2005). Il existe différents types d'approche dans la littérature pour la modélisation du marché du travail.

Les approches classiques de modélisation du marché du travail

La macroéconomie établit des théories générales qui, à partir des relations avec d'autres agrégats de l'économie, comme la consommation, l'inflation ou le produit intérieur brut, en déduisent un taux de chômage. Cette approche est générale et ne convient pas au cadre de notre étude, car elle ne permet pas de modéliser de façon fine le fonctionnement du marché au niveau local des interactions entre les acteurs du marché du travail.

La microéconomie, quant à elle, consiste à se placer au niveau des entités individuelles et à chercher un équilibre du marché à partir d'équations modélisant les comportements des travailleurs et des employeurs. Dans ces études, les agents sont considérés comme parfaitement rationnels. Ils maximisent leurs profits jusqu'à l'infini et sont omniscients. Ils ont une vision parfaite de leur environnement. Ces agents représentatifs sont modélisés avec des systèmes d'équations qui représentent des comportements agrégés. Cependant (Simon, 1955) montre que cette hypothèse de rationalité parfaite des agents économiques n'est pas vérifiée empiriquement. Ces travaux ont été confirmés par des recherches en psychologie (Tversky et Kahneman, 1974), qui ont montré que les gens ont des difficultés à prendre des décisions dans des situations complexes, en particulier lorsqu'ils évoluent dans un environnement incertain. De plus, le besoin d'obtenir des solutions analytiques conduit ces modèles à seulement inclure un nombre limité de caractéristiques du marché du travail. Ces modèles ne peuvent pas rendre compte de l'hétérogénéité des individus et des entreprises.

Toutes ces limites des modèles analytiques justifient le besoin de sortir du cadre d'un agent représentatif et de repartir du niveau individuel des comportements des agents.

1. Les termes économiques sont définis dans un glossaire situé à la fin de ce mémoire

L'approche de la modélisation multi-agent en économie

Une nouvelle approche a été proposée dans la littérature à partir des années 1970. Il s'agit des modèles multi-agents en économie ou modèle ACE pour *Agent-based Computational Economics*. Dans ces modèles, le marché du travail est vu comme un système dynamique complexe. Les individus, employeurs et travailleurs, sont représentés par des agents qui évoluent et interagissent dans un monde artificiel.

Cette approche permet une modélisation ascendante (*bottom-up*). A partir de la simulation des interactions entre les individus, modélisées par des lois microéconomiques, vont émerger des lois macroéconomiques caractéristiques du marché. Ce type de modèle permet de mieux modéliser les interactions entre les agents économiques. Il a aussi l'avantage de repartir du niveau individuel des agents et permet une modélisation plus réaliste du comportement des acteurs humains (demandeurs d'emploi, employeurs, employés, ...) et des institutions du marché travail (contrats de travail, minima sociaux, ...).

Il existe actuellement peu de modèles ACE pour le marché du travail, et la plupart sont des modèles normatifs et abstraits. Nous les présenterons dans le chapitre 1.

Notre approche

Dans cette thèse, nous souhaitons montrer les apports de l'approche multi-agent pour caractériser finement le marché du travail d'un pays. Par rapport ce qui est généralement proposé dans la littérature des modèle ACE, il s'agit de développer un modèle plus descriptif et calibré sur un grand nombre de données réelles. Le modèle vise à mieux comprendre le rôle des institutions et notamment des contrats de travail sur le fonctionnement du marché. Nous nous inscrivons dans la continuité du modèle ARTEMIS (Ballot, 1981; Ballot, 2002), qui a été le premier modèle multi-agent pour étudier le marché du travail français. Nous améliorons la première version du simulateur Worksim développée par (Lewkovicz, 2010).

L'utilité pratique de ce travail est de construire une plateforme multi-agent qui puisse être un outil d'aide à la décision pour proposer et évaluer des politiques publiques de l'emploi. Cette plateforme informatique est développée avec le langage de programmation Java. Elle s'appuie sur la technologie des Systèmes Multi-Agents qui permet notamment :

- de modéliser les acteurs du marché du travail avec des agents hétérogènes et autonomes qui ont leurs propres attributs, connaissances, buts et mécanismes décisionnels
- de modéliser les processus de communication et d'interaction entre les individus de façon explicite et réaliste, sans système central de contrôle
- d'incorporer un grand nombre d'éléments précis du cadre institutionnel du marché du travail français. Ces éléments constituent les règles de fonctionnement du marché qui influencent les comportements des agents.
- de permettre une conception modulaire et incrémentale du modèle. Il est ainsi possible de mettre à jour au fur et à mesure le module de droit du travail, de réactualiser le modèle avec des données plus récentes, ou bien d'ajouter de nouveaux acteurs ou institutions.
- d'analyser le modèle à différents niveaux, au niveau microéconomique des comportements de chaque agent, mais aussi au niveau macroscopique des propriétés émergentes du marché.

Les objectifs de la thèse

Les objectifs de la thèse sont les suivants :

1. nous souhaitons développer un modèle cohérent sur le plan de la théorie économique pour construire une analyse générale des mobilités sur le marché du travail. Nous utiliserons des théories existantes qui ont été validées par l'expérience avec notamment :
 - la théorie de la recherche (Stigler, 1962)
 - la théorie du capital humain (Becker, 1975)
 - la théorie de l'appariement (Jovanovic, 1979)

Le modèle doit être en mesure de rendre compte notamment de la concurrence sur le marché du travail entre les différentes catégories de main-d'œuvre, de la diversité des salaires, des productivités et des trajectoires de carrière des individus.

2. nous souhaitons développer les processus cognitifs des acteurs du marché du travail dans un cadre de rationalité limitée au sens de (Simon, 1955) pour modéliser les comportements des agents. Les agents doivent être capables de percevoir des changements dans leur environnement et de s'adapter en conséquence.
3. nous souhaitons aussi que le modèle puisse rendre compte des principales caractéristiques de la démographie et de la répartition des entreprises en France. Le modèle a vocation à être une maquette du marché du travail français à échelle réduite.
4. le modèle doit être aussi capable de rendre compte d'un grand nombre de faits stylisés du marché du travail français. Il doit être validé sur des données réelles. Il doit aussi permettre d'établir une comptabilité des stocks et flux bruts des individus entre les principaux états : emploi (avec la distinction CDI-CDD), chômage et inactivité. Il s'agit ici de caractériser de manière fine le marché du travail français.
5. le modèle doit permettre de simuler des politiques du marché du travail et d'en mesurer les effets suivant une palette d'indicateurs diversifiés (chômage par catégorie, salaires, bénéfices des entreprises, bien-être des individus, précarité, etc.).
6. le modèle doit être un outil pour l'analyse explicative du marché du travail français. Il doit pouvoir permettre de mesurer l'effet à plus ou moins long terme d'une politique de l'emploi ciblée sur la catégorie des agents bénéficiaires, mais aussi sur les catégories des agents non-bénéficiaires (effets d'éviction). Il s'agit de montrer les potentialités de ce type d'outil par rapport à d'autres approches et de mettre au point un premier prototype d'outil d'aide à la décision pour les politiques publiques.
7. enfin la plateforme doit être modulable et extensible pour être applicable à l'étude du marché du travail d'un autre pays, qui possède un cadre institutionnel et démographique différent. Nous souhaitons donner des pistes qui permettraient d'étendre le modèle WorkSim pour étudier le marché du travail sénégalais. Cette thèse s'inscrit en effet dans le cadre d'une collaboration avec le Sénégal. Elle est financée par le Programme Doctoral International pour la Modélisation des Systèmes Complexes (PDI-MSc) de l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD).

Plan de la thèse

Le document s'organise en sept chapitres. Le premier chapitre, État de l'art, présente la théorie de la recherche et les modèles de recherche analytiques. Nous introduirons ensuite les modèles multi-agents en économie et détaillerons principalement les modèles multi-agents du marché du travail existants. Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation du modèle WorkSim, avec une description du cadre économique et de la structure du modèle, suivie d'une description des modèles cognitifs des agents et du cycle de la simulation. Dans le troisième chapitre, nous présentons l'implémentation du modèle informatique WorkSim. Dans le quatrième chapitre, nous exposerons la méthode pour déterminer les paramètres. Il s'agit de confronter le modèle aux données réelles et de vérifier si l'on peut reproduire les faits stylisés observés dans la littérature économique. Dans le cinquième chapitre, nous aborderons des éléments de validation du modèle, ainsi qu'une première analyse pour caractériser le marché du travail français et comprendre son fonctionnement tant au niveau des schémas de mobilité des agents qu'au niveau microéconomique des comportements. Dans le chapitre six, nous évaluerons des politiques publiques suivant trois principaux axes : des politiques liées aux coûts du travail, des politiques axées sur la réduction du temps de travail et enfin des politiques liées aux contrats et à la protection de l'emploi. Enfin, le chapitre sept conclura ce mémoire.

Chapitre 1

État de l'art

La théorie de la recherche est devenue une référence depuis les années 1960-70 pour étudier les interactions entre les agents sur le marché du travail et analyser le chômage. Cette théorie, proposée au départ par (Stigler, 1962), repose sur l'idée que le processus d'appariement entre un chercheur d'emploi et une offre d'emploi prend du temps et qu'il a un coût, ce qui génère donc des frictions sur le marché du travail. La théorie de la recherche a été formalisée tout d'abord par des modèles de recherche analytiques qui se placent dans un contexte d'équilibre du marché et modélisent le comportement d'un agent représentatif. Ils sont constitués d'un système d'équations stochastiques résolu de manière analytique ou numérique. Une autre approche pour modéliser le marché du travail s'est développée à partir des années 1970 avec les travaux de (Bergmann, 1974) et (Eliasson, 1977). Il s'agit des modèles ACE pour (*Agent-based Computational Economics*) qui prennent la forme de programmes informatiques qui simulent les interactions entre un grand nombre d'agents hétérogènes, employeurs et travailleurs, sur une plateforme multi-agent. Dans cette nouvelle approche, le marché du travail est vu comme un système dynamique complexe, sans nécessairement supposer l'existence d'un équilibre. Le premier modèle ACE, qui a mis en œuvre la théorie de la recherche avec les deux côtés du marché du travail, est le modèle ARTEMIS développé au début des années 1980 (Ballot, 1981; Ballot, 2002). C'est dans la continuité de ce travail que s'inscrit notre modèle WorkSim.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons la théorie de la recherche. La partie suivante sera consacrée à la description de modèles de recherche analytiques. Nous étudierons ensuite les apports des modèles ACE par rapport aux modèles analytiques. Nous terminerons enfin par une présentation des contributions du modèle WorkSim par rapport aux modèles multi-agents existants.

1.1 La théorie de la recherche

Dans les modèles classiques de l'offre de travail, chaque individu cherche à maximiser une fonction d'utilité qui représente un compromis entre le temps libre et le revenu. Ces modèles distinguent donc deux états sur le marché du travail : l'état d'inactif pour les agents qui choisissent le temps libre et l'état d'employé pour ceux qui choisissent le revenu du travail (Cahuc, 2014). Pour faire cet arbitrage, il est supposé que les individus ont une connaissance

parfaite d'un salaire unique proposé dans l'économie et qu'ils ne passent pas de temps à chercher un emploi mieux rémunéré.

Or (Stigler, 1962) montre qu'en réalité les individus disposent d'informations imparfaites sur la distribution des salaires proposés dans l'économie. Les agents passent du temps à chercher un emploi pour augmenter leur chance de trouver une offre avec un meilleur salaire. Cette recherche prend du temps et génère un coût. Il y a donc un arbitrage à faire pour un individu entre accepter un emploi tout de suite pour un salaire donné ou bien continuer à chercher pour avoir une chance d'obtenir un emploi avec un meilleur salaire. Le niveau de salaire qui détermine si le chômeur a intérêt à accepter un emploi tout de suite plutôt que d'attendre est appelé le *salaire de réservation* exposé par (Phelps, 1970). Ces observations empiriques mènent à la théorie de la recherche (*job search*) qui tient compte d'éléments nouveaux par rapport à la théorie classique de l'offre de travail. Parmi ces éléments nouveaux :

- l'état de chômeur est pris en compte en plus des états d'inactif et d'employé. Un chômeur est un agent qui n'a pas d'emploi, mais qui a un comportement actif de recherche d'emploi, ce qui le distingue de l'inactif¹.
- une distinction est réalisée entre le chômage volontaire et le chômage involontaire. Une partie des agents sont au chômage volontairement. Ils pourraient obtenir un emploi tout de suite mais ils n'ont pour l'instant pas trouvé d'offres au dessus de leur *salaire de réservation*. Cette notion de chômage volontaire rejoint la définition d'un chômage "classique" et explique qu'une partie du chômage est due au fait que les chômeurs n'acceptent pas des salaires plus bas pour compenser un excès d'offre sur le marché du travail (si on ne tient pas compte d'autres facteurs de rigidité du salaire comme le salaire minimum ou le poids des syndicats dans la négociation salariale par exemple). Les chômeurs acceptent cependant de revoir à la baisse leur *salaire de réservation* au fil du temps s'ils ne trouvent pas d'emploi. Pour ces chômeurs qui ont un *salaire de réservation* très bas mais qui ne trouvent toujours pas d'emploi, on parle alors de chômage involontaire qui peut être dû à une insuffisance de la demande de travail de la part des entreprises (ce qui rejoint la notion de chômage "keynesien") ou bien à d'autres facteurs comme le salaire minimum.
- la théorie de la recherche apporte aussi la notion de chômage "frictionnel" lié à l'imperfection des informations sur les salaires et sur les emplois proposés dans l'économie. Ce chômage s'explique par la durée qu'il faut pour qu'un chercheur d'emploi et un employeur se rencontrent sur le marché. Il y a deux éléments qui entrent en compte : l'élément prix avec le salaire de réservation et l'élément quantité, c'est à dire que le taux d'arrivée des offres influe aussi sur la durée du chômage.

1.2 Les modèles de recherche analytiques

Les premiers modèles qui formalisent cette théorie de la recherche sont développés par (McCall, 1970) et (Mortensen, 1970). Au début, il s'agit de modèles uniquement du côté de

1. On note que cette définition de l'état de chômeur rejoint la définition actuelle du chômeur au sens du BIT

l'offre de travail (des individus). Ces modèles ont ensuite été étendus pour prendre en compte les deux côtés du marché du travail (firmes et individus).

Dans cette section nous présentons un bref panorama des modèles de recherche analytiques depuis les 40 dernières années et nous montrons les avancées de ces modèles à l'aide de trois exemples :

- le modèle partiel dans les années 1970
- le modèle d'appariement (Mortensen et Pissarides, 1994)
- une extension du modèle d'appariement pour prendre en compte deux contrats sur le marché du travail (Bentolila *et al.*, 2010)

Nous avons choisi de présenter les équations de ces modèles en détail du moins pour le modèle partiel de façon à exposer concrètement les hypothèses et les mécanismes utilisés. Certains de ces mécanismes seront repris dans notre modèle WorkSim, mais dans un cadre théorique de recherche plus large.

1.2.1 Le modèle de recherche partiel

Nous présentons ici le modèle de base résumé par (Cahuc *et al.*, 2014) et qui peut connaître différentes variantes.

1.2.1.1 Description du modèle

Le modèle de recherche de base repose sur les hypothèses suivantes :

- les chômeurs reçoivent une assurance chômage sous la forme d'un revenu par unité de temps s'ils ne travaillent pas
- les chômeurs peuvent choisir l'intensité de leur recherche d'emploi
- Les chômeurs ne peuvent pas rechercher un autre emploi une fois employé
- le modèle évolue en état stationnaire (en moyenne les variables du modèle ne changent pas de valeur au cours du temps)

Dans ce modèle, le chômeur est supposé être un agent parfaitement rationnel qui met en place une stratégie optimale de recherche d'emploi en fixant un *salaire de réservation* en dessous duquel il refusera les offres d'emploi. Conformément à la théorie de la recherche, le chômeur a des informations imparfaites sur les salaires proposés pour chaque emploi et dans son processus de recherche d'emploi, il ne peut pas se diriger automatiquement vers les emplois avec les meilleurs salaires. Il connaît cependant la distribution de probabilités décrivant l'ensemble des salaires possibles dans l'économie, notée H . Dans le modèle de base le temps libre n'est pas pris en compte et l'utilité du travail correspond directement à w le salaire proposé pour le poste. Chaque période de temps dt , un employé reçoit l'utilité $w dt$. Par ailleurs, un emploi a une probabilité $q dt$ d'être détruit chaque période, avec q un paramètre exogène.

Calcul de l'utilité d'être en emploi Pour un agent qui est en emploi au temps t , la valeur espérée de son état après la période dt correspond au salaire $w dt$ qu'il a perçu pendant cet intervalle de temps à laquelle on ajoute la valeur de son nouvel état après dt . Dans cet intervalle de temps dt , son emploi a une probabilité $q dt$ d'être détruit et dans ce cas l'individu passe dans l'état de chômeur et obtient l'utilité espérée d'être au chômage $V_u(t + dt)$ estimée au temps $t + dt$. Si son emploi n'est pas détruit, ce qui arrive avec une probabilité $(1 - q dt)$, l'individu reste en emploi et perçoit dans ce cas l'utilité espérée d'être en emploi au temps $t + dt$, notée $V_e(t + dt)$. A $t + dt$, la valeur de son état est donc $w dt + q dt V_u(t + dt) + (1 - q dt) V_e(t + dt)$.

Si r est le taux d'intérêt dans l'économie ou facteur de préférence pour le présent, la valeur actualisée de son emploi à t est donc :

$$V_e(t) = \frac{1}{1 + r dt} (w dt + (1 - q dt) V_e(t + dt) + q dt V_u(t + dt)) \quad (1.1)$$

Le modèle évoluant en état stationnaire, les utilités espérées à t et à $t + dt$ dans les états d'employé et de chômeur sont supposées être constantes. On les note respectivement V_e et V_u . On obtient donc :

$$V_e = \frac{1}{1 + r dt} (w dt + (1 - q dt) V_e + q dt V_u) \quad (1.2)$$

On multipliant cette équation par $1 + r dt$, en réarrangeant les termes et en divisant par dt , on obtient l'expression de la valeur espérée d'être en emploi en fonction du salaire reçu par période, de la probabilité de perdre son emploi, de l'utilité espérée d'être au chômage et du taux d'actualisation :

$$V_e(w) = V_u + \frac{w - r V_u}{r + q} \quad (1.3)$$

Par ailleurs, à chaque pas de temps, un agent chômeur peut recevoir une offre d'emploi avec un salaire w . La stratégie optimale du chômeur est d'accepter l'offre si l'utilité d'être en emploi avec ce salaire est supérieure à l'utilité d'être au chômage, c'est-à-dire si $V_e(w) > V_u$. Cette condition permet donc de définir un seuil de salaire au dessus duquel le chômeur accepte une offre (salaire de réservation). C'est le salaire qui correspond à $V_e(w) = V_u$.

Processus de recherche d'emploi et utilité d'être au chômage A chaque période de recherche d'emploi, l'individu dans l'état *chômeur* paie un coût c qui représente le coût de la recherche d'un emploi (candidatures à des offres, perte de temps de loisir à cause de la recherche d'un emploi, etc.). Il gagne par contre chaque période un montant b qui correspond aux indemnités chômage où bien à des revenus des autres membres de son ménage. Le gain net lié à la recherche d'emploi est $z = b - c$.

Pendant cette phase de recherche, le chômeur reçoit chaque période dt une offre d'emploi avec une probabilité λdt supposée constante. La distribution de probabilité des salaires possibles associés à ces offres d'emploi et qui est connue par le chômeur est H . Donc l'utilité

espérée d'une offre d'emploi, que le chômeur accepte si le salaire proposé w est supérieur à son salaire de réservation x , est :

$$V_\lambda = \int_0^x V_u dH(w) + \int_x^{+\infty} V_e(w) dH(w) \quad (1.4)$$

Le chômeur reçoit une offre d'emploi avec la probabilité λ qui lui donne une utilité V_λ et il a une probabilité $1 - \lambda$ de ne pas recevoir d'offres. Dans ce cas, son utilité est celle de rester au chômage soit V_u . Il perçoit par ailleurs le montant $z dt$ par période de temps dt . Avec le même raisonnement que pour établir l'utilité d'être en emploi (cf. equation 1.3), l'utilité espérée et actualisée du chômeur est donc :

$$V_u = \frac{1}{1 + r dt} (z dt + \lambda V_\lambda dt + (1 - \lambda dt) V_u) \quad (1.5)$$

En multipliant les deux côtés par $1 + r dt$, en divisant par dt et en remplaçant V_λ par son expression donnée par l'équation 1.4, on obtient :

$$r V_u = z + \lambda \int_x^{+\infty} (V_e(w) - V_u) dH(w) \quad (1.6)$$

Calcul du salaire de réservation A partir des équations 1.6 et 1.3, on en déduit l'expression du salaire de réservation :

$$x = z + \frac{\lambda}{r + q} \int_x^{+\infty} (w - x) dH(w) \quad (1.7)$$

Le salaire de réservation est égal au revenu lié à la recherche d'emploi à laquelle s'ajoute la valeur espérée de ce que la recherche d'emploi peut rapporter au-delà du salaire de réservation.

Calcul du taux de sortie de l'emploi Un chômeur accepte un emploi s'il reçoit une offre d'emploi avec un salaire supérieur à x , ce qui arrive avec une probabilité $(1 - H(x))$. Le taux de sortie du chômage est donc $\lambda(1 - H(x))$ et la durée moyenne du chômage est

$$T_u = \frac{1}{\lambda(1 - H(x))} \quad (1.8)$$

Plus x augmente, plus $1 - H(x)$ diminue est donc plus T_u augmente.

1.2.1.2 Apports du modèle

Ce modèle formalise la notion de chômage volontaire et met en évidence l'effet des incitations sur le chômage. Avec les équations 1.8 et 1.7, il apparaît que la durée moyenne du chômage est croissante avec le salaire de réservation qui lui même est croissant avec le montant des allocations chômage. Une augmentation trop forte des allocations chômage peut donc avoir un effet négatif sur le chômage, car elle n'incite pas les chômeurs à accepter un emploi. Cet effet a pu être montré par diverses études empiriques (Cahuc, 2014).

Cependant, le modèle montre aussi que l'augmentation du niveau des allocations chômage augmente le salaire de réservation (cf. equation 1.7), ce qui augmente la qualité des emplois acceptés par les chômeurs et donc leur durée. L'effet du montant des allocations chômage sur le taux de chômage dans l'économie est donc ambigu. Diverses études ont donc cherché à établir quel est le niveau optimal des allocations chômage pour diminuer le chômage. (Chetty, 2008) conclut par exemple qu'une allocation égale à 50% du salaire de l'employé pendant sa période de chômage pourrait être un niveau optimal dans le cas de l'économie américaine.

1.2.1.3 Extension de ce modèle partiel de recherche d'emploi

De nombreuses extensions de ce modèle de base ont été proposées dans la littérature. Une extension importante est la prise en compte de l'état d'inactif (Van den Berg, 1990). Dans ce modèle, le chômeur continue à rechercher un emploi seulement si son utilité espérée est supérieure à un salaire de réserve qui correspond au revenu de l'inactif (revenu minimum sans le coût de la recherche d'emploi). Ce modèle permet de mettre en évidence l'effet de chômeur découragé. Une augmentation forte du chômage a tendance à baisser le taux de participation sur le marché du travail.

Dans ces modèles partiels un grand nombre de variables comme le taux d'arrivée des offres pour les chercheurs d'emploi et la distribution des salaires dans l'économie sont exogènes. Un seul côté du marché du travail est modélisé et les entreprises sont supposées ne pas observer les salaires de réservation des travailleurs. (Diamond, 1971) critique ce modèle en soulignant que si les entreprises sont rationnelles et connaissent le salaire de réservation des travailleurs, elles n'ont pas de raisons de proposer des salaires au-dessus de ce salaire de réservation, ce qui réduit la distribution des salaires proposés dans l'économie à un unique point et contredit l'hypothèse d'une répartition des salaires (suivant la fonction H) qui est fondamentale pour ce modèle. C'est en effet précisément cette répartition des salaires qui conduit les chercheurs d'emploi à poursuivre leur recherche pour espérer obtenir une meilleure offre (cf. équation 1.7).

Ces limites du modèle partiel amènent à considérer l'autre côté du marché du travail et à prendre en compte aussi les décisions rationnelles des firmes. A partir des années 1980, sont ainsi proposés des modèles de recherche analytiques avec les deux côtés du marchés du travail. Le lien entre l'offre et la demande de travail est modélisé avec une fonction d'appariement.

1.2.2 Le modèle de recherche avec fonction d'appariement

Ce modèle de recherche prend comme point de départ le modèle de recherche partiel présenté dans la section 1.2.1 pour modéliser le côté des individus. Le côté des entreprises est modélisé de façon symétrique. Les entreprises cherchent à pourvoir des postes vacants et cette recherche, tout comme la recherche d'emploi, implique aussi un coût et prend du temps. Dans ce modèle, le processus d'appariement qui fait la rencontre entre un chercheur d'emploi et un poste vacant repose sur l'idée que la probabilité qu'un chercheur obtienne une offre dépend du ratio entre le nombre d'offres disponibles et le nombre de chercheurs

d'emploi. Nous présentons ici un modèle d'appariement de référence de cette littérature, celui de (Mortensen et Pissarides, 1994).

1.2.2.1 Description du modèle

Hypothèses du modèle Dans ce modèle, il y a une unique firme représentative de l'ensemble des entreprises du marché et constituée d'un unique poste de travail qui peut être dans deux états, vacant ou pourvu (symétrique des états de chômeur et d'employé pour les individus). L'emploi est caractérisé par un facteur de technologie et produit une unité d'un produit différencié dont le prix est $p + \sigma\epsilon$. Ce prix représente la productivité de l'emploi ou simplement le prix du bien produit. Un choc exogène sur le poste peut arriver selon un processus de Poisson de taux λ . Dans ce cas le nouveau facteur ϵ est retiré suivant une distribution de probabilité $F(x)$. Les firmes créent des emplois qui correspondent à la partie supérieure de cette distribution de productivité, notée $p + \sigma\epsilon_u$. Une fois créé, un poste peut ne plus être rentable pour l'entreprise s'il reçoit un choc de productivité qui fait passer sa composante de productivité spécifique en dessous d'un seuil critique noté ϵ_d , avec $\epsilon_d < \epsilon_u$, car, comme recréer un poste implique un coût de vacance c par unité de temps, une firme s'accorde "une marge de tolérance" en dessous de ϵ_u . Selon ce modèle, le taux de destruction des postes est donc $\lambda F(\epsilon_d)$.

La fonction d'appariement Le taux d'appariement qui détermine le nombre de rencontres entre les chercheurs d'emploi et les postes vacants par unité de temps est une fonction notée $m(u, v)$ qui dépend de u , le taux de chômage, et de v , le taux d'emplois vacants. Cette fonction est de type Cobb-Douglas. Elle est homogène de degré 1. La probabilité pour un chômeur d'être embauché est $m(v, u)/u$ et la probabilité pour un poste vacant de trouver un candidat est $q = m(v, u)/v$.

Modélisation de la demande de travail (côté des firmes) La valeur (ou utilité) pour la firme d'un poste vacant est notée V . Le coût de maintien d'un poste vacant par intervalle de temps dt est c . La valeur d'un poste pourvu dont la composante spécifique de productivité est ϵ est notée $J(\epsilon)$. La probabilité de trouver un candidat pour un poste vacant est $q(v/u)$. En reprenant le même raisonnement que pour établir la valeur de l'état d'employé dans le modèle de recherche partiel (équation 1.3), la valeur actualisée d'un poste vacant est :

$$V = \frac{1}{1 + rdt} (-c dt + q(v/u)J(\epsilon_u) + (1 - q(v/u))V) \quad (1.9)$$

En multipliant par $1 + rdt$, en réarrangeant les termes et en divisant par dt , les auteurs obtiennent :

$$rV = -c + q(v/u)(J(\epsilon_u) - V) \quad (1.10)$$

À l'équilibre, les firmes créent des postes vacants jusqu'à ce que la valeur d'un poste vacant soit nulle, c'est-à-dire $rV = 0$.

Négociation du salaire Le gain d'un appariement pour le travailleur est $W(\epsilon) - U$, valeur de l'emploi avec un salaire $W(\epsilon)$ moins valeur du chômage. Pour la firme, le gain de l'appariement est $J(\epsilon)$, c'est la valeur d'un emploi pourvu. La valeur totale d'un appariement (ou surplus) pour les deux parties est donc : $S(\epsilon) = J(\epsilon) + W(\epsilon) - U$. Dans ce modèle, le salaire est déterminé de façon à répartir ce surplus entre la firme et le travailleur avec une proportion fixe. Le travailleur reçoit une proportion β de ce surplus et la firme une proportion $1 - \beta$, avec β est une constante entre 0 et 1 qui représente le poids dans la négociation salariale des travailleurs.

Le salaire d'un travailleur est donc :

$$W(\epsilon) - U = \beta S(\epsilon) \quad (1.11)$$

et l'entreprise reçoit $J(\epsilon) = (1 - \beta)S(\epsilon)$.

Valeur d'un emploi et utilité du chômage Un choc arrive avec un taux λ , et on rappelle qu'en cas de choc, le nouveau facteur de productivité de l'emploi ϵ est retiré suivant une distribution de probabilité $F(x)$. L'emploi est détruit par l'entreprise si ce choc fait passer sa valeur en dessous de 0. Donc en cas de choc, la valeur espérée de l'emploi est $\int (Max(J(x), 0) dF(x)$.

La valeur actualisée d'un emploi pour la firme est donc :

$$J(\epsilon) = \frac{1}{1 + r dt} ((p + \sigma \epsilon) dt - w(\epsilon) dt + \lambda dt \int (Max(J(x), 0) dF(x) + (1 - \lambda dt) J(\epsilon)) \quad (1.12)$$

En multipliant par $(1 + r dt)$, en réarrangeant les termes et en remplaçant, $J(x)$ par $(1 - \beta)S(x)$, les auteurs obtiennent :

$$r J(\epsilon) = p + \sigma \epsilon - w(\epsilon) + \lambda (1 - \beta) \int (Max(S(x), 0) - S(\epsilon)) dF(x) \quad (1.13)$$

De la même manière pour l'employé, on aboutit à l'équation de la valeur de l'emploi pour l'individu :

$$r W(\epsilon) = w(\epsilon) + \lambda \beta \int (max(S(x), 0) - S(\epsilon)) dF(x) \quad (1.14)$$

De façon similaire à l'équation qui donne la valeur d'un poste vacant (équation 1.10) en fonction de la probabilité d'un appariement, on a l'équation de l'utilité du chômage côté individu :

$$r U = b + (v q / u) [W(\epsilon_u) - U] \quad (1.15)$$

avec b l'utilité du chômage par période (allocations chômage et temps libre en dehors de la recherche d'emploi).

Équation de la courbe de Beveridge Dans ce modèle, le taux de création d'emploi $u \times m(v/u, 1)$ est égal au taux de rencontre d'une offre par un chômeur multiplié par le taux de chômage. Le taux de destruction d'emploi est égal à $\lambda F(\epsilon_d)(1 - u)$, c'est le taux de destruction d'un emploi

multiplié par le taux d'emploi $(1 - u)$. A l'équilibre, le taux de création d'emploi est égal au taux de destruction d'emploi, donc :

$$u \times m(v/u, 1) = \lambda F(\epsilon_d) \times (1 - u) \quad (1.16)$$

Si $\lambda F(\epsilon_d)$ est connu, on peut en déduire l'expression du taux de chômage u en fonction du taux de vacance v , c'est l'équation de la courbe de Beveridge. Cette courbe de Beveridge décrit la relation entre le taux de chômage u et le taux de postes vacants v dans l'économie.

Système d'équations de Bellman et résolution Ces 5 équations stochastiques 1.10, 1.11, 1.13, 1.14 et 1.15 forment un système d'équations dit de *Bellman*. Avec l'équation de la courbe de Beveridge (eq. 1.16), les auteurs déterminent les valeurs des trois inconnues du modèle, u , v , et ϵ_d . On rappelle que ϵ_d est le niveau critique de productivité d'un poste en dessous duquel la firme détruit le poste.

Ils en déduisent l'équation de la courbe de Beveridge et le point d'équilibre sur cette courbe (qui correspond au taux de création et destruction des emplois dans l'économie) en fonction des paramètres exogènes du modèle.

En réalisant des analyses de variantes, le modèle permet d'identifier les paramètres qui ont une influence sur la courbe de Beveridge et sur le taux de chômage d'équilibre. Il apparaît qu'un choc de macroéconomique agrégé, représenté par une augmentation de p ou une réduction de b accroît v/u et décroît ϵ_d . Dans ce cas, la courbe de Beveridge se rapproche de l'origine et le taux de chômage diminue. Il y a moins de chômage frictionnel dans l'économie. Une augmentation de la variance des chocs agrégés σ augmente à la fois le nombre de créations et de destructions d'emploi. La courbe de Beveridge s'écarte de l'origine car il y a plus de chômage frictionnel. Le taux d'emploi vacant augmente mais l'effet total sur le taux de chômage reste ambigu, car il y a la fois plus d'entrées et de sorties de l'emploi.

1.2.2.2 Apports et extensions du modèle

Ce modèle de recherche avec fonction d'appariement souligne l'importance des flux d'entrée et de sortie de l'emploi pour caractériser le marché du travail et met en évidence des paramètres déterminants du chômage frictionnel. Il permet aussi de déduire la courbe de Beveridge d'une économie et montre l'influence de facteurs exogènes agrégés comme le progrès technologique ou le niveau de demande global sur le chômage d'équilibre. Cependant, dans ce modèle, le rôle des institutions du marché du travail n'est pas pris en compte. Ainsi par exemple, l'entreprise peut licencier sans coût et sans besoin de justification un employé (cf. équation 1.13). Le modèle ne prend pas non plus en compte la notion de contrat qui implique une relation de travail sur la durée.

1.2.3 Le modèle d'appariement avec deux contrats

Le modèle de (Bentolila *et al.*, 2010) propose une extension du modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) avec l'introduction de contrats permanents et de contrats temporaires :

- Un contrat permanent (CDI en France) est un contrat sans durée préalablement fixé. Pour se séparer de l'employé, il y a en général un coût pour l'entreprise (coût de licenciement) et il y a besoin de justifier légalement ce licenciement (ce qui peut prendre du temps et générer un coût supplémentaire).
- un contrat temporaire (CDD en France) est un contrat avec une durée déterminée au moment de la signature du contrat. Il y a en général un coût très faible de fin de contrat. Le recours à ces contrats temporaires est encadré par la loi et diverses restrictions s'appliquent, comme par exemple en France, le besoin de respecter un délai de carence entre la signature de deux contrats temporaires sur un même poste.

Le modèle est calibré pour être appliqué aux marchés du travail de la France et de l'Espagne. Dans ces pays, les contrats temporaires représentent une part très importante des embauches, mais aussi une part importante des sorties de l'emploi. L'enjeu de cette étude est de comprendre quels sont les déterminants du choix par les entreprises entre le contrat permanent et le contrat temporaire et de mesurer les effets de ces choix de contrat sur le chômage.

1.2.3.1 Description du modèle

Hypothèse Le modèle prend en compte les deux côtés du marché du travail et l'interaction entre l'offre et la demande de travail est modélisée avec une fonction d'appariement. Les auteurs retiennent les mêmes hypothèses que dans le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) pour la modélisation de la productivité des emplois et des chocs de productivité. Les nouveaux éléments sont l'introduction de deux contrats, contrat temporaire et permanent, avec des coûts de licenciement pour le contrat permanent, des coûts de préavis pour licencier un individu et une procédure de renégociation de salaire.

Du côté de l'offre de travail, l'obtention d'un contrat temporaire ou permanent est exogène. Un chômeur reçoit une offre de contrat temporaire avec une probabilité p et une offre de contrat permanent avec une probabilité $1 - p$. Les contrats temporaires se terminent avec une probabilité λ par unité de temps. Pour détruire un contrat permanent, il y a un coût f . Une fois que l'entreprise déclenche la procédure de licenciement, une permission arrive avec un taux σ qui traduit le temps qu'il faut pour pouvoir effectivement licencier la personne. Pendant cette période de préavis l'employé produit le moins possible et son salaire est fixé au niveau moyen de l'économie.

Description du modèle Avec la même méthode que pour les modèles partiel et d'appariement présentés dans les sections 1.2.1 et 1.2.2, les auteurs établissent un système d'équations de Bellman avec en tout dix équations, cinq du côté de l'entreprise et cinq du côté du travailleur. La différence principale avec le système d'équations du modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) est que la valeur (ou utilité) de l'emploi pour un individu ou une entreprise est différenciée suivant le type de contrat associé au poste.

1.2.3.2 Résultats du modèle

Les auteurs analysent l'influence d'une baisse de la probabilité p qu'un chômeur reçoive une offre de contrat temporaire dans sa recherche d'emploi. Cette réduction de p est interprétée comme une mesure de restriction légale de l'usage du contrat temporaire par les entreprises. Elle conduit à réduire le taux de création global des emplois dans l'économie car les entreprises ne remplacent pas toutes les créations de contrats temporaires par des créations de contrats permanents, à cause notamment des coûts de licenciement. Cependant, les auteurs montrent que l'effet sur le chômage d'une restriction des contrats temporaires est ambigu, car il conduit aussi à une diminution du nombre de sorties vers le chômage et donc moins de chômage frictionnel (effet de rotation ou *churning* mis en évidence par (Blanchard et Landier, 2002a)).

Les auteurs calibrent ce modèle pour l'Espagne et la France et étudient l'évolution des marchés du travail de ces deux pays pendant la crise de 2005 à 2008. Ils montrent que pour un pays, dans lequel il y a à la fois peu de restrictions pour embaucher en contrat temporaire et des coûts de licenciement importants pour les contrats permanents, un choc de demande agrégé négatif peut entraîner une forte augmentation du chômage. Le marché français est caractérisé par plus de restrictions dans l'usage du contrat temporaire (CDD) que l'Espagne, c'est ce qui explique que son taux de chômage ait beaucoup moins augmenté (-45% en moyenne) que pour l'Espagne pendant la crise.

1.2.3.3 Apports du modèle

Le modèle montre le rôle des institutions et des politiques de protection de l'emploi sur le marché du travail. L'augmentation de la protection des contrats permanents réduit le taux de rotation de ces contrats. Cependant, cette protection forte conduit les entreprises à remplacer les contrats permanents par des contrats temporaires. Cette substitution augmente la mobilité sur le marché du travail et induit une segmentation (ou dualité) entre les travailleurs en contrat permanent et ceux en contrat temporaire (Cahuc, 2014). De plus, le taux excessif de rotation des employés en contrat temporaire peut contrecarrer l'effet stabilisant de la protection de l'emploi des contrats permanents.

1.2.4 Bilan des modèles de recherche analytiques

1.2.4.1 Apports de ces modèles

Ces modèles formalisent la théorie de la recherche avec les deux côtés du marché du travail. Ils montrent l'effet des incitations sur le chômage du côté de l'offre de travail. Ils mettent aussi en évidence des mécanismes du marché du travail comme l'importance des flux de création et de destruction d'emplois. Ils soulignent le rôle clé des politiques de l'emploi sur ces flux et mettent en évidence le phénomène de la segmentation sur le marché du travail. La force de ces modèles est que le changement d'un paramètre du modèle (institutionnel ou comportemental) est immédiatement pris en compte dans les équations de comportements de tous les agents (cf. équation 1.10, 1.11, 1.13, 1.14 et 1.15). Les agents s'adaptent donc à leur environnement de façon dynamique.

1.2.4.2 Éléments de ces modèles que nous reprenons dans le modèle WorkSim

Ces modèles de recherches analytiques mettent en évidence des mécanismes importants notamment au niveau des processus de recherche des agents qui seront repris dans notre modèle WorkSim :

- nous reprenons la notion de salaire de réservation pour un chercheur d'emploi (cf. section 1.2.1) . Nous travaillerons cependant plutôt avec un niveau d'utilité de réservation qui prend en compte d'autres éléments que le salaire (cf. section 2.5.1 de description du modèle), mais l'idée est la même : un chômeur accepte une offre d'emploi si l'utilité associée à cet emploi est supérieure à son utilité de réservation.
- nous reprenons aussi l'idée que ce salaire de réservation (ou utilité de réservation) est influencé par la distribution des offres dans l'économie (cf. équation 1.7). Cependant dans notre modèle, nous nous placerons dans un cadre de rationalité limitée et nous supposerons que l'individu n'a pas la connaissance de l'ensemble des offres d'emploi disponibles dans l'économie. Le chômeur sait seulement estimer une distribution des salaires à partir d'un nombre limité d'informations dont il dispose.
- nous modélisons aussi comme dans l'équation 1.7 l'effet des allocations chômage sur le niveau de l'utilité de réservation.
- nous reprenons le principe d'une modélisation des deux côtés du marché du travail comme dans le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) avec des comportements de recherche des individus mais aussi des entreprises qui cherchent à pourvoir leurs postes vacants.
- nous modélisons un marché du travail avec un choix de contrat par les entreprises, CDD et CDI, comme dans le modèle de (Bentolila *et al.*, 2010)

1.2.4.3 Limites de ces modèles

Cependant ces modèles ont de nombreuses limites :

Limites des modèles à cause du besoin d'obtenir des solutions analytiques Tout d'abord, comme évoqué par (Richiardi, 2006), le besoin d'obtenir des solutions analytiques conduit ces modèles à seulement inclure un nombre limité de caractéristiques du marché du travail. Par exemple dans ces modèles, une firme correspond à un unique poste et la destruction des emplois est exogène (cf. section 1.2.2 sur le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994)).

Hypothèse de stabilité de la fonction d'appariement Le mécanisme d'appariement (cf. section 1.2.2) est très simple et supposé stable face aux changements institutionnels et macroéconomiques. Le nombre d'appariements par période ne dépend que du taux de chômage et du taux d'emplois vacants. (Neugart, 2008) montre que cette hypothèse de stabilité de la fonction d'appariement peut induire un biais si on introduit une politique de l'emploi.

Limite du cadre de l'agent représentatif Le concept de l'agent représentatif est dans le fond difficilement compatible avec le concept de recherche qui s'appuie justement sur l'hypothèse d'une hétérogénéité des salaires (et donc des firmes) pour justifier que les individus passent du temps à chercher un emploi qui convient. A cause de cette limite de l'agent représentatif, ces modèles ne peuvent pas non plus mettre en évidence des effets contraires d'une politique publique sur les différentes catégories de main d'œuvre.

Hypothèse irréaliste d'un agent parfaitement rationnel Ces modèles représentent le comportement d'agents supposés parfaitement rationnels. Par exemple, dans le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994), la firme maximise son profit à chaque pas de temps jusqu'à l'infini (cf. équation 1.12). Pour effectuer ces calculs d'optimisation, il est aussi supposé que les agents ont une vision parfaite de l'environnement et de toutes les probabilités du modèle. Par exemple, pour calculer l'utilité d'être en emploi, le chômeur connaît la probabilité qu'un emploi soit détruit chaque période (cf. équation 1.3 du modèle partiel). Dans la réalité, il n'y a pas de raison *a priori* que cette probabilité soit connue par un chômeur.

(Simon, 1955) montre que l'hypothèse de rationalité parfaite des agents économiques n'est pas vérifiée empiriquement. Ces travaux ont été confirmés par des recherches en économie expérimentale et en psychologie (Smith, 1991). Vernon Smith, lauréat du prix Nobel en 2002 avec Daniel Kahneman, a montré que les gens ont des difficultés à prendre des décisions dans des situations complexes, en particulier lorsqu'ils évoluent dans un environnement incertain. Ils se contentent d'estimations.

1.2.4.4 Vers une nouvelle approche de la modélisation du marché du travail

Toutes ces limites des modèles analytiques justifient le besoin de sortir du cadre d'un agent représentatif et de repartir du niveau individuel des comportements des agents. C'est à partir de ces comportements et des interactions que pourront émerger les lois macroéconomiques observées sur le marché.

Une nouvelle approche a été proposée dans la littérature, il s'agit des modèles ACE pour *Agent-based Computational Economics* qui simulent les interactions des agents hétérogènes dans l'économie. Ces agents peuvent être dans des états multiples et sont en concurrence sur le marché du travail. Il est donc impossible d'avoir recours à l'optimisation par les méthodes de programmation dynamique habituelles de Bellman comme dans les modèles présentés dans les sections 1.2.1, 1.2.2 et 1.2.3.

Dans ces modèles, les règles de décision des agents sont représentées avec des mathématiques proches du langage informatique et les comportements sont en général instanciés suivant le principe de rationalité limitée. Les agents révisent leurs décisions à la lumière de leur expérience et par collecte d'informations. Cet apprentissage continu est très cohérent avec le concept de recherche.

1.3 Les modèles multi-agents du marché du travail

L'origine des modèles ACE remonte à (Orcutt, 1957) qui proposa un modèle de microsimulation de l'économie américaine.

Les modèles se sont développés ensuite suivant deux différentes branches jusqu'à nos jours :

- la branche des modèles de microsimulation qui sont restés dans la lignée du modèle d'Orcutt. Une revue de ces modèles est proposée par (Thibault *et al.*, 2003). On pourra citer par exemple le modèle de microsimulation *Destinie* (Bardaji *et al.*, 2003). C'est un outil développé pour évaluer sur le long terme l'impact des réformes des régimes de retraite sur les comportements d'activité et le niveau des pensions en France. Dans ce modèle, les agents sont hétérogènes et les événements démographiques des individus (mariages, décès, naissances...) sont pris en compte de façon précise. Le modèle est dynamique et une partie des comportements des agents sont modélisés avec des règles de décision. Par exemple, dans *Destinie* un individu choisit de cesser ou non son activité en comparant le bien-être qu'il peut escompter s'il diffère son départ à celui qu'il aura s'il liquide immédiatement ses droits à la retraite. Cependant, les trajectoires de carrière des individus sont modélisées avec des lois probabilistes. Les changements de situation des individus sur le marché du travail se font à partir de probabilités obtenues à partir de l'enquête emploi. Ce type de modèle met l'accent sur des données microéconomiques très précises, mais moins sur les comportements des agents. Il n'y a pas d'interactions entre les agents.
- à partir des années 1970, sont apparus les modèles multi-agents en économie, ACE, avec les travaux de (Bergmann, 1974) qui modélise l'économie américaine avec différents secteurs d'activité et d'(Eliasson, 1977) qui modélise l'économie suédoise. Ces modèles sont au départ très proches des modèles de microsimulation, dans le sens où ils reproduisent une population complète d'un pays, avec des ménages, des processus démographiques, etc. Le modèle ARTEMIS (Ballot, 1981; Ballot, 2002) a été le premier modèle multi-agent pour étudier le marché du travail français. Ces modèles mettent l'accent sur les interactions. Les agents *individu* comme *entreprise* sont en concurrence sur le marché.

A partir des années 2000 s'est développée toute une communauté ACE et des travaux ont été réalisés dans de nombreux domaines. Une revue des modèles multi-agents en économie a été proposée par (Ballot *et al.*, 2014). On peut citer par exemple des travaux sur les marchés financiers (Hommes, 2006; Derveeuw *et al.*, 2007), sur le marché des biens (Mignot *et al.*, 2012) ou bien en économie industrielle (Chang, 2011).

Dans ces modèles une question centrale est l'analyse du marché vu comme un système complexe. Ce marché émerge à partir des interactions entre les agents dans le cadre d'une organisation (Ballot *et al.*, 2014). Les agents sont autonomes : "ce sont des entités situées dans un environnement, qui perçoivent cet environnement et qui peuvent agir dessus. Ils ont des tendances et des buts qui leurs sont propres" (Franklin et Graesser, 1997). Un agent peut être composé d'autres agents, ce qui permet des constructions hiérarchiques (Tsfatsion, 2006). Par exemple, une firme est un agent, et elle est composée

d'un dirigeant et d'employés qui sont eux même d'autres agents du modèle.

Ces modèles permettent une représentation des comportements individuels plus réaliste et plus proche de l'expérience par rapport aux modèles classiques (Barlet *et al.*, 2009). Ils font appel aussi aux nouvelles techniques de l'intelligence artificielle pour faire évoluer les comportements des agents, avec des algorithmes génétiques (Ballot et Taymaz, 2001) ou bien de l'apprentissage (Richiardi, 2006). Dans ce dernier modèle, les agents révisent leurs règles de décision en fonction des revenus qu'ils ont perçus lors des périodes précédentes. De cette façon les individus s'adaptent en permanence à leur environnement qui évolue.

Parmi les modèles multi-agents du marché du travail, on peut distinguer deux principales catégories, suivant notamment l'objectif de l'étude :

- les modèles multi-agents normatifs, qui se placent dans un cadre abstrait. Ils ne sont pas appliqués à l'étude du marché d'un travail en particulier. Ils visent à montrer les potentialités de l'approche multi-agent par rapport à des approches plus classiques à chaque fois sur des points précis.
- les modèles multi-agents du marché du travail détaillés et calibrés. Ces modèles sont plus proches des modèles de microsimulation par leurs objectifs. Ils visent à comprendre le fonctionnement du marché du travail et à quantifier de façon précise l'effet de politiques publiques pour un pays.

Parmi ces modèles du marché du travail, une autre distinction peut être faite, d'après (Neugart *et al.*, 2012), suivant si le modèle modélise uniquement le marché du travail, ou bien si le marché du travail est seulement un module intégré dans un modèle macroéconomique plus vaste.

Nous présenterons dans les sections suivantes des exemples récents pour chaque type de modèle du marché du travail et nous étudierons les apports des modèles multi-agents par rapport aux modèles analytiques.

1.3.1 Les modèles multi-agents "normatifs" ou "abstrait" du marché du travail

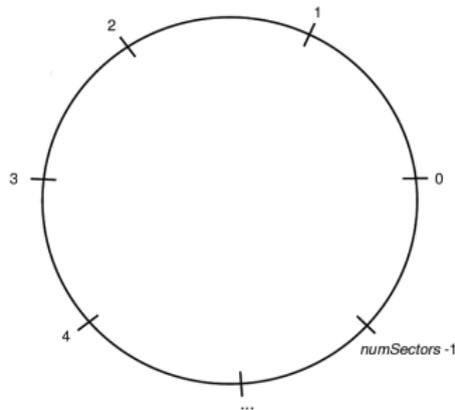
Ces modèles montrent les apports de l'approche multi-agent pour modéliser le marché du travail par rapport aux modèles classiques. Ces principaux apports sont notamment :

- la prise en compte de l'hétérogénéité des agents et des effets d'éviction
- l'intégration d'une structure d'interactions riche entre les agents
- la reproduction conjointe d'un grand nombre de faits stylisés du marché du travail dans un même modèle

1.3.1.1 Mise en évidence des effets d'éviction lors de l'application d'une politique publique

(Neugart, 2008) propose un modèle ACE qui permet de quantifier l'impact au niveau global d'une politique de formation et de mesurer les inégalités en termes d'accès à l'emploi qui peuvent survenir lors de l'application d'une politique publique.

Description du modèle L'auteur modélise un marché du travail découpé en différents secteurs. Dans chacun de ces secteurs, des agents "entreprise" ont des demandes spécifiques en terme de compétences requises pour pourvoir les postes qu'elles proposent. Les entreprises sont supposées être placées autour d'un cercle :



Les différences entre les compétences requises dépendent de l'éloignement entre les différents secteurs. Sur ce schéma, par exemple, les entreprises du secteur 0 sont plus proches des entreprises du secteur 1 que du secteur 4. Au début de la simulation, des agents "travailleur" sont affectés de manière aléatoire aux entreprises de chaque secteur.

A chaque période un choc exogène peut survenir avec une probabilité donnée et obliger toutes les entreprises d'un secteur à fermer. Les employés de ce secteur se retrouvent donc au chômage. Ils ne peuvent a priori pas postuler aux postes vacants dans les autres secteurs car ils n'ont pas les compétences requises. Pour changer de secteur et espérer retrouver un nouvel emploi, ils doivent investir dans leur capital humain. Acquérir des compétences pour les secteurs directement adjacents coûte $humCapInvCost$, puis, $2 \times humCapInvCost$ pour les deux autres secteurs suivants et ainsi de suite.

La décision d'un demandeur d'emploi pour choisir une stratégie d'investissement dans son capital humain se fait à l'aide d'un processus d'apprentissage par renforcement.

Dans ce marché du travail, le gouvernement peut choisir d'appliquer une politique de formation qui consiste à prendre en charge une partie de ces coûts en investissement humain.

Résultats et apports du modèle En augmentant la subvention pour la formation des demandeurs d'emploi, l'auteur montre que le taux de chômage général diminue, ce qui souligne l'impact bénéfique au niveau global d'une politique publique de formation professionnelle. Par contre, si le gouvernement choisit une politique de formation qui ne cible qu'une partie des individus, le groupe qui a reçu des subventions réduit son taux de chômage de façon significative, tandis que l'autre groupe voit son taux de chômage augmenter. Cet effet découle d'une pénalisation des salariés qui n'ont pas reçu d'aides pour se requalifier. Ils sont en effet mis en concurrence sur le marché de l'emploi avec ceux qui les ont reçues. Cet article souligne l'apport des systèmes multi-agents pour modéliser plus finement l'impact des politiques de formation au niveau des agents et pour visualiser les déséquilibres qui peuvent se créer entre

différentes populations d'agents hétérogènes qui reçoivent ou non des subventions.

1.3.1.2 Introduction d'une structure riche d'interactions

D'autres modèles multi-agents mettent l'accent sur les réseaux professionnels et sur l'accès à l'information sur le marché du travail (Tassier et Menczer, 2001; Tesfatsion *et al.*, 2003; Thiriot *et al.*, 2011). Par exemple, dans (Tassier et Menczer, 2001), les auteurs proposent un modèle ACE qui modélise différents types de réseaux qui peuvent exister et mesurent leurs impacts en terme de taux de chômage, cette fois-ci au niveau de groupes d'agents, plutôt qu'au niveau global.

Description du modèle Le modèle est composé de deux graphes, un pour les emplois et un pour les connexions sociales qui peuvent relier les individus. Les auteurs considèrent qu'il y a M emplois à pourvoir. Chaque emploi peut être dans deux états : occupé ou vacant. Les emplois sont représentés par des nœuds dans le graphe. Si un lien existe entre deux nœuds, il sera noté $J(j, k)$, ce qui signifie que la personne qui occupe l'emploi j connaît l'état de l'emploi k . Ceci modélise des similarités entre les emplois par exemple en termes de localisation, compétences requises, niveau de qualification, etc...

Il y a N agents dans le modèle qui sont représentés par des nœuds dans un deuxième graphe. Chaque agent peut occuper un des M emplois disponibles. Les connexions sociales sont notées $S(h, i)$, ce qui indique que les individus h et i peuvent échanger des informations sur les emplois vacants qu'ils connaissent. A chaque pas de temps, un lien $J(j, k)$ peut être détruit avec une probabilité δ_j . Dans ce cas, il sera remplacé par une nouvelle connexion $J(j, k')$. Ainsi, plus δ_j est proche de 1, plus la structure du marché du travail est erratique. Pour $\delta_j = 1$ le réseau de l'emploi est complètement aléatoire.

Le graphe des agents est divisé en deux groupes avec γN agents appartenant au premier groupe et $(1 - \gamma)N$ agents appartenant au second. Si $\gamma \neq 1/2$, il y a une majorité et une minorité.

Au début des simulations, les agents sont connectés seulement avec d'autres agents du même groupe qu'eux. Chaque connexion $S(h, i)$ peut disparaître avec une probabilité δ_A et δ_B respectivement dans chacun des groupes A et B. Quand une connexion est supprimée, une nouvelle connexion $S(h, i')$ est recréée entre le même agent de départ et un nouvel agent. Ψ est la probabilité que ce nouvel agent soit dans le même groupe que l'agent d'origine. Donc $1 - \Psi$ est la probabilité qu'une connexion se fasse avec l'autre groupe. Ainsi Ψ permet de déterminer l'importance de la ségrégation dans le modèle. Les auteurs montrent que si $\Psi = 1$, les connexions ne peuvent pas évoluer en dehors du groupe d'origine, qui est donc parfaitement ségrégué. Au début de la simulation chaque agent "travailleur" a un emploi. Il peut le perdre avec la probabilité ρ , ce qui crée un poste vacant dans l'économie. Un travailleur est au courant que ce poste est libre avec la probabilité s_A ou s_B s'il appartient au groupe A ou B. Il peut en plus recevoir de l'information à propos d'un poste vacant via son réseau de connexions.

Résultats et apports du modèle En étudiant le modèle, les auteurs montrent que le groupe A (réseau social aléatoire) est plus performant que l'autre groupe si $\delta_j = 1$ et $\Psi = 0$, c'est-à-dire si le réseau des emplois est aléatoire et qu'il n'y a pas de ségrégation. En effet, quand

l'information sur un nouveau poste vacant arrive de manière aléatoire, un agent a plus intérêt à se retrouver connecté le plus possible en moyenne aux autres agents. Par contre si le réseau est non aléatoire et avec ségrégation, c'est le groupe B dont la structure est figée qui est plus performant que le groupe A. Dans ce cas, il devient possible pour le groupe d'agents de contrôler l'information qu'il détient à propos de nouvelles offres d'emploi et d'en faire profiter uniquement ses membres. Les auteurs mettent en évidence l'importance de la notion de diffusion de l'information via un réseau d'interactions sur le marché du travail.

1.3.1.3 La reproduction conjointe de régularités du marché du travail

Le modèle ACE proposé par (Fagiolo *et al.*, 2004) étudie l'émergence de régularités de façon conjointe avec un unique modèle. Ces régularités avaient seulement été étudiées de manière séparée avec des approches classiques :

- la courbe de Beveridge dont l'équation est établie dans le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) (cf. section 1.2.2). Cette courbe montre une corrélation négative entre le taux de chômage et le taux de postes vacants sur le marché du travail. L'éloignement de cette courbe par rapport aux axes du plan traduit le degré de friction existant dans le marché du travail
- la courbe de salaire qui montre la corrélation négative qui peut exister entre le taux de chômage et le niveau des salaires. Elle a été empiriquement validée dans de nombreux contextes de marché du travail, mais toujours sur des données homogènes et circonscrites à un environnement restreint (région précise, mêmes institutions, etc...) (Card et Hyslop, 1997). Son fondement théorique repose sur l'idée qu'un plus haut taux de chômage induit moins de pouvoir de négociation pour les travailleurs et implique donc des salaires plus faibles. L'équilibre économique est maintenu, car dans un contexte de plus haut chômage, les salariés travaillent plus pour ne pas perdre leur emploi, même s'ils reçoivent un salaire inférieur.
- la courbe d'Okun qui caractérise le lien entre le marché du travail et l'activité économique (Okun, 1970). Il apparaît une relation linéaire et négative, de pente inférieure à -1, entre le taux de chômage et le PIB. Cette relation découle de l'idée qu'une sous-utilisation des forces de travail par rapport à un niveau d'emploi de référence conduit, "toutes choses égales par ailleurs", à une perte d'activité économique, à laquelle il faut ajouter des coûts sociaux supplémentaires liés à l'augmentation du chômage.

Le modèle de (Fagiolo *et al.*, 2004) simule les marchés du travail et de production de biens et les intègre dans des cycles économiques plus larges suscités par des avancées technologiques. Ces avancées technologiques sont modélisées par l'augmentation par palier et de façon aléatoire d'un facteur de productivité de chaque travailleur au fil du temps. Chaque changement de ce facteur de productivité représente l'amélioration de différents facteurs de production de l'entreprise : organisation du travail, performance du matériel, expérience et qualification des employés...

Les auteurs étudient l'impact de deux cadres d'études différents pour leur simulation :

- le cadre "Walrasian Archetype" (WA), dans lequel il n'y pas de dépendance temporelle

de l'offre et de la demande d'emploi. Les agents ne sont pas influencés par leurs expériences passées pour choisir un nouveau travail.

- le cadre "Institutionally-Shaped Environnement" (ISE), qui introduit des dépendances temporelles dans l'offre et la demande d'emploi : les entreprises offrent un nombre d'emplois au temps t qui va dépendre de leur profit à $t - 1$, les travailleurs ont plutôt tendance à rester dans les entreprises dans lesquelles ils sont employés.

Ces deux cadres d'études sont évalués avec ou sans progrès technologique. Pour chaque jeu d'hypothèses, les auteurs notent l'émergence ou non de régularités agrégées dans le modèle. Il apparaît que les courbes d'Okun et de salaire émergent de façon robuste pour toutes les hypothèses testées, ce qui montre que ces relations, entre le taux de chômage et le PIB d'une part, et le taux de chômage et le niveau des salaires d'autre part, sont caractéristiques de la dynamique du marché du travail pour un large éventail de paramètres. La relation de Beveridge qui traduit une dépendance du taux de chômage par rapport au taux de postes vacants n'émerge pas de façon systématique et apparaît seulement dans le cadre de l'hypothèse ISE pour laquelle les offres et les recherches d'emploi sont caractérisées par des dépendances temporelles. Ce résultat met en évidence l'influence de la structure du marché et des comportements microéconomiques sur l'observation de régularités globales.

1.3.2 Les modèles multi-agents du marché du travail intégrés dans un modèle macroéconomique

Une deuxième catégorie de modèle ACE, sont des modèles macroéconomiques plus vastes dans lesquels tout le cycle économique est modélisé et dans lequel le marché du travail en constitue seulement une partie. On peut citer par exemple, le modèle EURACE (Dawid *et al.*, 2012) qui a pour objectif de modéliser l'économie européenne à grande échelle. Il met en jeu des dynamiques sophistiquées entre les grands secteurs de l'économie : marché du travail, évolution industrielle, marché du crédit, consommation. Cependant, les mécanismes d'interaction sur le marché du travail sont peu évolués : les entreprises comparent simplement le niveau de force de travail globale fournie par leurs employés avec leur niveau de demande exigé par le marché des biens de consommation. Si cette force de travail est supérieure à la quantité de production nécessaire, des individus sont licenciés, sinon de nouveaux travailleurs sont embauchés. Les recrutements et les licenciements se font par des tirages aléatoires avec des probabilités qui dépendent des compétences générales des agents travailleurs.

Dans (Dawid *et al.*, 2009), les auteurs mettent en lumière l'aspect dynamique des mutations qui apparaissent au fil du temps entre deux régions hétérogènes. Le modèle qu'ils proposent est développé dans le cadre du projet EURACE.

Description du modèle Le modèle est composé d'un marché du travail, d'un marché de consommation et d'un marché de capitaux pour la production des biens. La simulation fait interagir deux types d'agents actifs et deux types d'agents passifs :

- des agents actifs de type "travailleur", qui travaillent et consomment des biens.

- des agents actifs de type "entreprise" qui emploient des travailleurs pour produire. Elles investissent et vendent des biens de consommation.
- des agents passifs "supermarché" qui permettent des échanges entre les consommateurs et les producteurs.
- des agents passifs de type "investisseur" qui vendent du capital aux entreprises.

Dans ce modèle, les entreprises peuvent investir dans de la technologie qui augmente la qualité des biens produits. Le niveau de qualité disponible augmente de façon stochastique à chaque période et le coût de l'investissement pour les entreprises augmente de façon proportionnelle à ce niveau de qualité. A chaque période, les entreprises planifient les quantités qu'elles souhaitent produire en fonction de la demande du marché et des stocks déjà existants. Pour produire les quantités désirées, les entreprises doivent disposer d'un niveau suffisant en terme de capital humain et financier.

Au départ, chaque entreprise offre un niveau de salaire spécifique et chaque demandeur d'emploi a un salaire de réserve en dessous duquel il ne souhaite pas être embauché. A chaque période, les employés postulent pour des postes vacants pour lesquels les offres de salaire sont au dessus de leur salaire de réserve.

L'originalité de ce modèle vient du fait que les agents "travailleur" et "entreprise" sont placés au début de la simulation dans deux régions différentes. Dans l'une de ces régions les travailleurs ont de faibles compétences et dans l'autre de hautes compétences (ce qui représente les conséquences d'une aide publique de formation non uniformément répartie entre les deux régions dans le modèle). Pour se déplacer d'une région à l'autre les agents "travailleur" doivent payer un "coût de migration", qui représente des coûts de mutation professionnelle (frais de déplacement, coûts sociaux et psychologiques liés à la mutation...).

Résultats et apports du modèle Contrairement à l'intuition que l'on pourrait avoir, ces résultats montrent que les frictions spatiales du modèle liées à l'introduction des coûts de migration ont un impact positif sur le taux de croissance globale de l'économie, car il apparaît qu'à la fin de la simulation le capital global des entreprises est plus élevé. En effet, ces frictions spatiales permettent de "séparer" artificiellement les marchés du travail de chaque région au début de la simulation. La région dans laquelle les travailleurs ont de faibles compétences va alors produire des biens moins chers que si la répartition des employés était uniforme, car les salaires sont plus bas. Il s'ensuit que la région à faibles compétences devient plus compétitive que l'autre région ce qui favorise la demande de biens et accroît l'investissement des entreprises. L'expansion de ces entreprises conduit à augmenter la demande de salariés plus qualifiés sur leur marché du travail, ce qui va générer une migration progressive des employés qualifiés vers la région à faibles compétences et contribuer à de plus en plus d'investissement en capital dans cette région au fil du temps.

Les auteurs montrent ainsi comment la dynamique du système économique peut être prise en compte avec un modèle ACE, ce qui aurait été difficile à montrer dans le cadre d'une étude macroéconomique qui se place dans la perspective d'un équilibre général.

1.3.3 Les modèles détaillés et calibrés du marché du travail

Le modèle ARTEMIS (Ballot, 1981 ; Ballot, 1988 ; Ballot, 2002) a ouvert la voie à des modèles détaillés et calibrés du marché du travail. A notre connaissance, ces modèles ont uniquement été appliqués au marché du travail français. Il n'existe pas de modèles aussi détaillés pour les pays étrangers². Ces modèles prennent en compte les deux côtés du marché du travail et les principaux éléments du droit du travail. Ils sont calibrés pour reproduire la comptabilité des stocks et des flux des individus et évaluer l'impact de politiques publiques de façon précise.

1.3.3.1 Modèle ARTEMIS

Le modèle ARTEMIS est un modèle multi-agent avec les deux côtés du marché du travail. Il modélise les flux bruts entre le chômage, l'inactivité et l'emploi permanent ou intérimaire, sur la base des décisions des agents qui prennent la forme de règles de décision en rationalité limitée. Le mécanisme de recherche d'emploi et d'appariement s'appuie sur la théorie de la recherche (cf. section 1.2.4.2).

Description du modèle Le modèle met l'accent sur le rôle de la dualité des types de gestion de main-d'œuvre entre les firmes, dans la ligne de (Doeringer et Piore, 1985), certaines investissant dans leur personnel, avec une sélection forte à l'entrée, une formation et des possibilités de promotion (les marchés internes), d'autres offrant certes des CDI mais sans souci d'intégration (gestion dite secondaire). Les firmes peuvent recourir au travail intérimaire, ce qui introduit un intermédiaire avec des caractéristiques spécifiques sur le marché, en particulier des contrats très courts, mais aussi une moindre exigence que pour l'embauche dans des CDI. Les individus peuvent être dans cinq états possibles sur le marché du travail : chômeur, inactif, intérimaire, employé en contrat permanent et employé à la recherche d'un autre emploi. Les individus prennent des décisions en rationalité limitée pour décider de rester dans leur état ou d'en changer. Les passages entre les états peuvent être occasionnés par des choix de l'individu (démissionner,...) ou bien des événements subis (licenciement, fin de contrat,...). Les mécanismes décisionnels des individus se font à l'aide de fonctions d'utilité, qui permettent à l'agent de mesurer l'intérêt qu'il a de rester dans son état courant par rapport à l'éventualité d'un changement d'état. L'individu choisit de changer d'état, s'il trouve un nouvel état atteignable caractérisé par une utilité supérieure à celle de son état courant. Le modèle prend en compte les principaux événements démographiques d'un individu (naissances, mariages, décès) et gère l'évolution des ménages. Il intègre aussi d'autres événements de la vie des individus comme les départs au service militaire pour les jeunes et les départs à la retraite pour les plus âgés.

La période de temps est de deux semaines et la simulation est lancée sur une période de 5 ans de 1972 à 1977 à partir d'une initialisation des individus, des ménages et des firmes sur des données de l'époque. Les paramètres du modèle sont calibrés à la main par essai et erreur pour reproduire des séries temporelles de l'évolution des taux de chômage et de vacance des postes observés sur la période d'étude.

2. Voir (Neugart *et al.*, 2012) pour une revue

Apports du modèle Le modèle montre que les catégories de main-d'œuvre ont des schémas de mobilité modérément différents en période de tension haute (chômage faible avant la crise), mais que ces schémas peuvent diverger brutalement sous l'effet d'un choc exogène de demande, du fait de forts effets d'éviction qui sont hautement non linéaires par rapport au choc. En l'occurrence, selon le modèle, le choc pétrolier de 1973-4 installe véritablement la segmentation sur le marché du travail français alors que celle-ci était marginale auparavant. Il montre aussi que l'intérim permet aux jeunes d'acquérir de l'expérience professionnelle pour s'intégrer ensuite dans les marchés internes, et que cet effet tremplin l'emporte fortement en termes de taux de chômage (et d'emploi) sur le rôle précarisant des emplois intérimaires.

1.3.3.2 Le modèle de (Barlet *et al.*, 2009)

Un autre modèle qui se place dans la continuité du modèle ARTEMIS pour étudier des politiques de l'emploi avec une approche multi-agent est le modèle de (Barlet *et al.*, 2009). Ce modèle multi-agent simule le marché du travail français de l'année 2006. Il s'inscrit dans la démarche de la microsimulation dans la mesure où il raisonne sur un échantillon réduit d'agents "individu" représentatif de la population française. Le modèle est dynamique et introduit des comportements des agents des deux côtés du marché du travail. Il y a cependant peu d'interactions entre les agents et une grande partie des comportements des agents sont modélisés avec des règles probabilistes. Le modèle est utilisé comme outil d'évaluation de politiques publiques pour simuler notamment l'influence de barèmes sociaux ou fiscaux.

Description du modèle Le modèle distingue des individus et des emplois (mais pas des entreprises). Chaque entreprise est assimilée à un poste. Les postes correspondent à quatre niveaux de qualification : non qualifié, à basse qualification, professions intermédiaires et cadres. Le modèle distingue deux types de contrats, CDD et CDI. Il ne prend pas en compte l'état d'inactif. Les décisions des individus se font avec des tirages aléatoires, comme démissionner ou partir à la retraite. Les fins de CDD sont aussi aléatoires, avec trois sorties alternatives supposées de même ampleur : séparation, renouvellement, titularisation sur un CDI. Le salaire des travailleurs repose sur une négociation salariale avec un paramètre exogène qui décrit le pouvoir de négociation du salarié. Le salaire est influencé aussi par le taux de chômage dans l'économie. Les décisions des entreprises en matière de création d'emploi et de gestion de leur main-d'œuvre s'appuient sur le calcul d'une marge. Cette marge est égale à la différence relative entre la production en valeur du poste à laquelle on retranche le coût du travail, qui inclut le salaire et les charges sociales. Les processus de recherche d'emploi et d'embauche se font par une fonction d'appariement comme dans le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) présenté plus haut (cf. section 1.2.2). Le pas de la simulation est annuel et le modèle est calibré avec une méthode de type inférence indirecte (Gourieroux *et al.*, 1993) de façon à fixer les valeurs de huit paramètres du modèle pour reproduire vingt cibles du marché du travail : les taux de chômage, les salaires moyens, l'ancienneté moyenne dans l'emploi et les proportions de salariés rémunérés en dessous de 1.3 et 1.6 SMIC pour les quatre niveaux de qualification.

Apports du modèle Le modèle est calibré de façon assez précise sur les données de 2006. Il a pour apport d'analyser assez finement les effets d'une augmentation du salaire minimum ainsi que ceux d'allègements de charge, en prenant en compte la distribution des salaires, ce qui entraîne des effets non linéaires difficiles à étudier par d'autres méthodes. Les résultats obtenus du modèle montrent l'intérêt qu'il y a à utiliser ce type de plateforme multi-agent pour analyser les effets et les coûts de façon précise d'une politique de l'emploi.

1.3.3.3 La première version du modèle WorkSim

Une première version du modèle WorkSim a été proposée par (Lewkovicz, 2010) pour étudier le marché du travail français sur la période récente. Ce modèle reprend les mécanismes décisionnels des individus du modèle ARTEMIS. Il remet à jour les éléments du cadre institutionnel français en 2007 (ARTEMIS était développé pour simuler le marché du travail dans les années 1970) : le salaire minimum d'insertion, le droit à l'assurance chômage et les principaux contrats de travail CDD et CDI.

Du côté des décisions des entreprises, la création d'emploi par les firmes est un mécanisme endogène mais le choix de contrat est exogène. La firme effectue un bilan annuel de ses revenus et de ses coûts. Si elle est en perte, elle supprime ses postes vacants et désigne des employés qui sont licenciés. Si la firme fait des bénéfices, elle crée alors un nouveau poste vacant avec un contrat de type CDD ou CDI tiré aléatoirement. Le poste est ensuite effectivement créé suivant un calcul coût-bénéfice du poste qui tient compte de la productivité de l'individu et du salaire à verser.

Le modèle est ensuite calibré pour reproduire le taux de chômage général en 2007 et pour trois classes d'âge 15-24 ans, 25-49 ans et 50-64 ans. Le modèle analyse les flux sur le marché du travail et les principales raisons qui conduisent les individus à changer d'état.

1.3.3.4 La nouvelle version du modèle WorkSim

La nouvelle version du modèle WorkSim que nous présenterons dans cette thèse reprend comme point de départ la version de (Lewkovicz, 2010) et la modélisation des individus comme dans le modèle ARTEMIS dans le cadre de la théorie de la recherche (cf. section 1.2.4.2).

Cependant, un grand nombre de mécanismes ont été revus ou ajoutés :

- Du côté des individus, le modèle introduit de nouveaux états d'étudiant et de retraité pour reproduire de façon plus fine les taux d'inactivité sur le marché du travail.

Des éléments de la théorie du capital humain (Becker, 1975) ont été ajoutés pour rendre compte d'une plus grande hétérogénéité des trajectoires professionnelles des individus. Ces capitaux humains seront des facteurs déterminants des niveaux de production et de salaires des individus. Ils peuvent être acquis en travaillant sur un poste ou bien en recevant une formation de la part de l'entreprise.

Par ailleurs, les décisions des individus prennent en considération de nouveaux critères de préférence comme la stabilité de l'emploi. Pour leur calcul de revenu, les individus tiennent aussi compte maintenant des statuts et des revenus des autres membres qui composent leur ménage.

- Le côté des entreprises a été complètement changé par rapport à la version de (Lewkovicz, 2010). Un nouveau type de poste de dirigeant a été introduit. Les choix des créations de postes et de contrat, ainsi que les mécanismes de gestion de la main d'œuvre (licenciements personnels et économiques, fins de période d'essai, renouvellements des contrats...) sont maintenant complètement endogènes. On introduit en plus la notion d'imperfection de l'information de l'employeur sur les véritables productivités des travailleurs. Le modèle cognitif des firmes est composé de modules de *perception*, d'*estimation* et d'*anticipation* qui lui permettent de s'adapter rapidement à une modification de l'environnement ou bien à un changement institutionnel.
- Le cadre légal est législatif a été remis à jour pour l'année 2011 et il prend en compte de nouvelles spécificités des contrats : délai de carence, délai de préavis, etc. Il prend en compte aussi les charges sociales et l'effet des politiques d'allègements de charges.
- Au niveau des interactions, les processus de recherche d'emploi et de recrutement ont été revus en tenant compte des caractéristiques des contrats et des nouveaux facteurs d'hétérogénéité des individus.

Le modèle est mis à l'échelle suivant la démographie de l'année 2011 pour la France et la répartition des entreprises par taille. Le modèle est ensuite calibré avec un algorithme évolutionnaire pour reproduire un grand nombre de données du marché du travail français en 2011 à différents niveaux.

Chapitre 2

Worksim : un modèle multi-agent du marché du travail français

Le modèle WorkSim est un outil d'analyse basé sur la méthodologie multi-agent ou ACE (*Agent-Based Computational Economics* (Tesfatsion, 2002)). Il simule un marché du travail avec des agents hétérogènes, individus et entreprises, qui interagissent entre eux suivant les principes de la théorie de la recherche et prennent des décisions en rationalité limitée. Dans la version du modèle présentée dans ce chapitre, les agents évoluent dans un environnement économique et institutionnel qui correspond à celui de la France en 2011. Le modèle WorkSim est cependant conçu de façon à être suffisamment générique pour être applicable à l'étude du marché d'un autre pays. Nous proposerons dans le chapitre 7.4 une extension de WorkSim pour étudier le marché du travail sénégalais.

Notre modèle s'inscrit aussi dans la démarche de la microsimulation initiée par (Orcutt, 1957), dans la mesure où nous effectuons une mise à l'échelle de 1/4700 ème de toute la population française en âge de travailler (de l'ordre de 10 000 agents) avec de nombreuses données démographiques.

Le premier objectif du modèle est de reproduire le fonctionnement du marché au niveau agrégé et au niveau des principales catégories de main-d'œuvre, de façon à établir une compatibilité cohérente des flux et des stocks d'individus entre les principaux états sur le marché du travail : emploi (avec la distinction CDD-CDI), chômage et inactivité. Nous pourrions ainsi caractériser le marché du travail de façon fine et étudier les déterminants de l'accès à l'emploi pour chaque catégorie d'individu.

Le second objectif est de simuler des politiques du marché du travail et de mesurer ses effets suivant un grand nombre d'indicateurs statistiques à différents niveaux : taux de chômage, taux d'activité, distribution des salaires, productivité, précarité, etc. L'apport majeur d'un modèle multi-agent est aussi de pouvoir mesurer les impacts d'une politique publique sur les trajectoires individuelles des agents et de mettre en évidence des effets d'éviction entre les cohortes d'individus.

Nous décrirons dans la première partie le cadre économique du modèle, puis dans la deuxième partie la structure du modèle informatique. Les parties suivantes seront consacrées à la description des agents "individu" et "entreprise". Nous présenterons ensuite les modèles

cognitifs de ces agents. Nous terminerons enfin par la description du cycle de la simulation.

2.1 Le cadre économique général du modèle WorkSim

Nous choisissons de travailler sur l'année 2011, car c'est l'année la plus récente pour laquelle nous disposons d'un grand nombre de données statistiques. Nous modélisons en détail le secteur privé du marché du travail français. Le secteur public sera modélisé à part, de façon à simplement reproduire une part exogène de fonctionnaires dans l'emploi total. Le seul facteur de production de l'entreprise modélisé est le facteur travail. Les revenus financiers et le capital des agents ne seront pas pris en compte.

Dans notre économie, le marché des biens est modélisé de façon exogène et chaque entreprise produit une même variété d'un bien de consommation dont le prix P est supposé unique et fixé arbitrairement à la valeur de 1 euro. On peut considérer par exemple que ces biens ont le même usage et la même qualité objective (lessives de différentes marques...). Chacune des entreprises (notée j par la suite) fait face à une quantité demandée $D_{j,t}$ qui fluctue à chaque période t du fait de variations stochastiques de la demande des consommateurs. Cependant nous maintenons constante la demande totale D_{tot} (somme des demandes aux firmes) pour l'année de référence qui sert de cadre à notre simulation de façon étudier le marché du travail français dans un environnement stationnaire (qui n'évolue pas dans le temps). La modélisation de cet environnement stationnaire implique de maintenir constants d'autres "invariants" du modèle :

- le nombre d'entreprises N_e .

Nous ne modélisons pas le processus de création des firmes dans le modèle, considérant qu'une entreprise qui fait faillite est remplacée par une nouvelle entreprise. Cette hypothèse simplificatrice est adoptée par la totalité des modèles de recherche analytique en équilibre, et la quasi-totalité des modèles macroéconomiques multi-agents. Un des très rares modèles faisant exception est le modèle MOSES (Eliasson, 1977) qui reproduit une dynamique de l'économie sur plusieurs années. Dans ce modèle, les perspectives de profit induisent l'entrée de nouvelles firmes.

- le nombre d'individu N_i en âge de travailler.

Un individu qui sort de la simulation est remplacé par un nouvel entrant. Il n'y a donc pas d'impact de la démographie sur le modèle.

- le progrès technique, considérant que la productivité de base d'un poste de travail ne s'accroît pas avec le temps

L'hypothèse de stationnarité est bien sûr artificielle car dans la réalité, l'environnement est en perpétuelle évolution. Elle nous permet cependant dans un premier temps de réaliser des expérimentations "toutes choses égales par ailleurs" et pourra être relâchée ultérieurement pour analyser par exemple l'effet de l'évolution du progrès technologique, de la démographie ou de la modification de la demande extérieure sur le marché du travail.

2.2 La structure générale du modèle informatique

La structure générale du modèle WorkSim est résumée sur la figure 2.1.

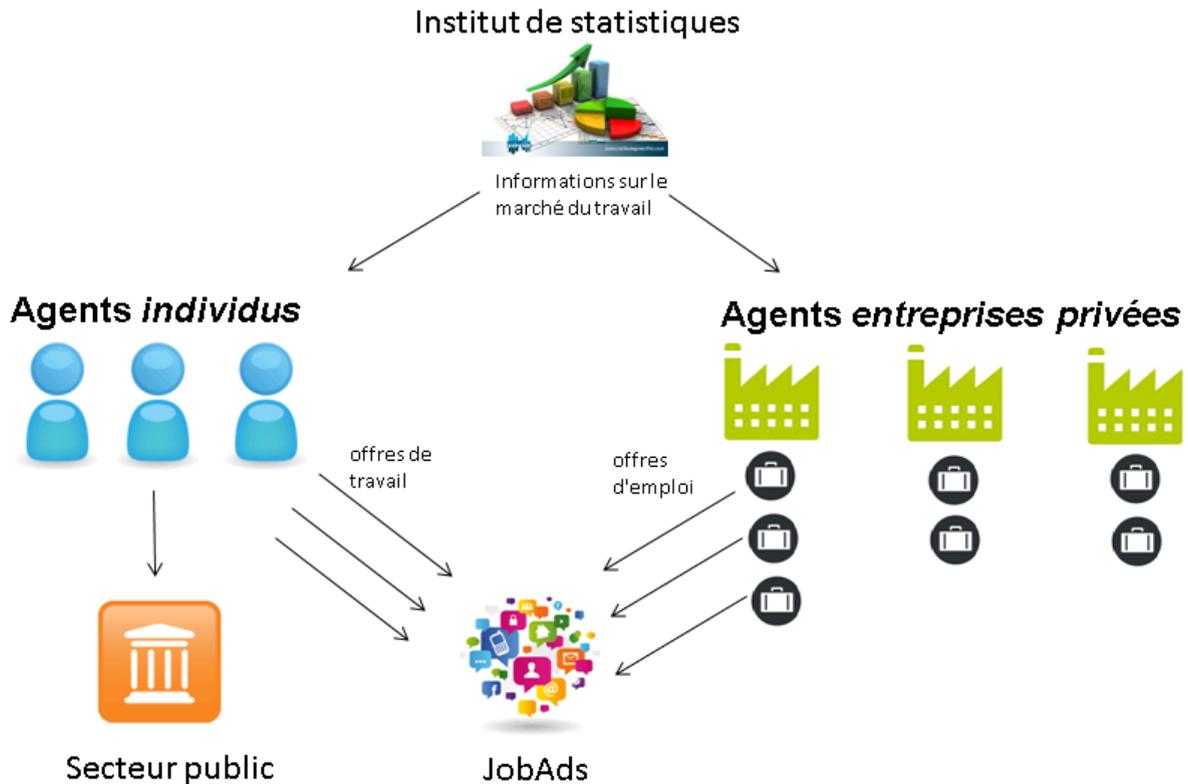


FIGURE 2.1 – Structure du modèle WorkSim

Les deux côtés du marché du travail français sont modélisés avec deux catégories d'agents hétérogènes et autonomes en interactions, des agents "individu" et des agents "entreprise privée". Ces agents prennent des décisions en rationalité limitée au sens de (Simon, 1956), c'est-à-dire qu'ils ont des comportements rationnels au sens où ils effectuent des choix qui reposent sur des critères logiques pour améliorer leur situation mais que leur rationalité est limitée en termes de capacité cognitive et d'informations qu'ils perçoivent. Les agents ont chacun des attributs spécifiques, déterminés une fois pour toute à leur création, ainsi que des variables internes qui évoluent tout au long de la simulation.

- Les agents "individu" correspondent à une mise à l'échelle de la population française selon la démographie de l'année 2011. Ces individus sont regroupés dans des ménages et la simulation évolue en population fermée. Cependant, seuls les individus en âge de travailler sur le marché du travail sont *instanciés* en temps qu'agent à part entière. Les autres agents (enfants en bas âge, personnes âgées) ne sont pas des agents à part entière, car ils ne prennent pas de décisions dans le modèle¹.

1. Néanmoins, ces agents *non-instanciés* participent indirectement aux décisions des autres membres du ménage (le nombre d'enfants à charge entre dans les mécanismes de passage à l'inactivité, la pension de retraite dans le calcul des revenus du ménage)

Les décisions des individus consistent à candidater à des offres d'emplois. S'ils sont déjà en emploi, ils peuvent aussi démissionner, soit pour un autre emploi, soit pour devenir inactif.

- Les agents "entreprise privée" correspondent à une mise à l'échelle du secteur privé de la France en 2011 suivant la répartition par taille de ses entreprises. Chacune de ces entreprises est constituée d'un ensemble de postes, avec un poste de dirigeant et des postes de salariés. La vie dans l'entreprise des salariés est modélisée. L'entreprise peut conclure un contrat de travail pour embaucher un individu sur l'un de ses postes. Ce même contrat peut ensuite être redéfini au cours de la vie du salarié dans l'entreprise. Le salarié peut aussi recevoir une promotion et changer de poste et de niveau de qualification au sein même de son entreprise. Nous distinguons ainsi dans WorkSim les entreprises, des postes, des contrats et des salariés.

Les décisions des entreprises consistent à créer ou supprimer des emplois de type CDD et CDI, en réponse à des chocs individuels, ainsi qu'à embaucher, promouvoir et licencier leurs salariés.

Ces deux catégories d'agent évoluent dans un environnement composé d'un module institutionnel et de trois *artifacts* (au sens de (Omicini *et al.*, 2008)) en tant qu'entités fournissant des services essentiels aux agents. Ce ne sont pas des agents informatiques proactifs qui prennent des décisions de manière autonome, contrairement aux agents individus et entreprises privées du modèle (Ferber, 1999). C'est pourquoi, ils ne sont pas unifiés en tant qu'agents, mais se distingue de ceux ci en tant qu'*artifacts*.

- Le module institutionnel comprend les principaux éléments du droit du travail (contrats de travail CDD et CDI, indemnités de licenciement, ...) et les effets des décisions gouvernementales (e.g. taux de remplacement des fonctionnaires partant à la retraite, les niveaux des salaires et allocations de référence comme le salaire minimum, les allocations chômage). Dans ce chapitre, nous présenterons une implémentation précise et assez complète du cadre institutionnel du marché du travail français en 2011 et nous supposons que les agents "entreprise privée" comme "individu" respectent les règles imposées par le droit du travail². Nous montrerons dans le chapitre 6 en effectuant des variantes de politique publique que l'environnement institutionnel peut avoir un impact très important sur le fonctionnement du marché du travail.
- Le premier *artifact* représente l'*État*³ qui recrute des fonctionnaires, prélève des cotisations sociales sur les entreprises, et détermine (de manière exogène) les politiques publiques du marché du travail.
- Le deuxième est l'*artifact JobAds*, qui répertorie les offres d'emploi des entreprises et les demandes d'emploi des individus, un peu à la manière d'un site internet de type "Job Center". *Jobads* est essentiellement un système d'information, qui ne se substitue en aucun cas au processus décentralisé de recherche des agents fondé sur la théorie de la recherche (voir section 2.6.5).

2. Une extension du modèle pourrait être de considérer que les agents aient la possibilité de ne pas respecter le droit du travail, ce choix de violer la loi se faisant selon une analyse coût-avantage en tenant compte des risques de sanction.

3. de manière très simplifiée mais suffisante pour notre modèle (voir section 2.4.4)

- Le troisième *artifact* est un *institut de la statistique* – très simplifié – qui calcule l'ensemble des statistiques issues d'une simulation du modèle et diffuse un nombre limité d'informations aux agents, comme la tension sur le marché du travail.

L'environnement dans lequel évolue les agents n'est pas spatialisé, ce qui ajouterait des contraintes d'appariements supplémentaires (coût de transports, recherche d'emploi restreint à une localité) et donc des frictions sur le marché du travail. Cependant nous modélisons indirectement cette contrainte de lieu en restreignant le nombre offres d'emploi reçues par les agents chaque période.

Pour plus de clarté dans l'exposé, nous choisissons de présenter tout d'abord les caractéristiques de chaque catégorie d'agent. Nous présenterons dans les sections suivantes le modèle cognitif des agents et leurs comportements à chaque période de la simulation.

2.3 Modélisation des agents "individu" et "entreprise privée" dans WorkSim

Un agent "individu" ou un agent "entreprise privée" du modèle est une entité virtuelle au sens de Ferber (Ferber, 1999) :

- il possède un ensemble d'attributs spécifiques qui le caractérisent ;
- il perçoit de façon limitée son environnement ;
- il est mû par une tendance, qui est pour l'agent "individu" d'atteindre un état avec un niveau d'utilité satisfaisant, et pour l'agent "entreprise privée" d'effectuer des profits.
- il peut agir dans l'environnement. L'individu a la capacité de travailler pour une entreprise et de produire des biens. L'entreprise a la capacité d'embaucher des salariés ou de les licencier par exemple ;
- il apprend et révisé ses règles de décision en fonction des événements qu'il rencontre
- il possède des compétences et offre des services
- il communique avec les autres agents en envoyant des messages pour postuler à des offres d'emploi ou embaucher un candidat par exemple.

2.3.1 Modélisation d'un agent "individu"

Un agent individu dans WorkSim représente un individu de la population française de plus de 15 ans. Les agents individus sont hétérogènes et sont chacun caractérisés par :

- des attributs spécifiques qui sont déterminés au moment de l'entrée dans la simulation. Ces attributs comme le genre ou la préférence de base pour le temps libre définissent son identité propre et influencent son comportement tout au long de sa carrière. Nous supposons que ces attributs ne sont pas modifiés au cours de la vie de l'agent.
- des variables internes qui évoluent à chaque période de la simulation. Certaines de ces variables internes sont modifiées dans le modèle de façon exogène.

Par exemple l'âge de l'individu est augmenté automatiquement à chaque période de la simulation. D'autres variables sont modifiées de façon dynamique en fonction des choix réalisés par l'agent et des situations qu'il rencontre (par exemple son niveau d'expérience).

— une histoire.

Le déroulement de la simulation est séquentiel et les agents individus conservent une trace de leurs situations passées. Cette dimension historique constitue un apport important d'un modèle multi-agent par rapport aux modèles analytiques. Elle permet d'introduire la notion de trajectoire individuelle ou de carrière de l'individu. Les événements passés ont une influence sur sa situation future.

— un ménage.

Un individu est intégré dans un ménage composé d'autres agents du modèle. La situation et le revenu des autres membres du ménage auront un impact sur ses décisions.

— un état.

Un individu est caractérisé par un *état* ou *situation* sur le marché du travail qui influence ses comportements. Pour chacun de ces états sont définies des variables d'état qui interviennent dans les mécanismes décisionnels.

2.3.1.1 Les attributs spécifiques de l'agent individu

Un agent individu (noté i par la suite) est caractérisé par des attributs spécifiques déterminés une fois pour toute au moment de sa création. Ces attributs ne sont pas modifiés au cours de la simulation.

Le genre Dans le modèle WorkSim, les individus ont un genre, masculin ou féminin. Ce genre a une influence sur les décisions de passage à l'inactivité de l'agent.

La préférence de base pour le temps libre α_{base} Comme dans le modèle ARTEMIS (Ballot, 2002), nous supposons que chaque individu a deux arguments qui lui donnent de la satisfaction (de l'utilité) : le temps libre et le revenu, dont on précisera plus loin les composantes (cf. section 2.5.1). Il y a un arbitrage fondamental entre le temps libre et le revenu puisque travailler augmente le revenu mais diminue le temps libre. C'est un arbitrage de base en microéconomie du travail (Henderson *et al.*, 1971). Chaque individu i a une préférence effective pour le temps libre modélisée par un paramètre $\alpha_{i,t}$ qui évolue au cours du temps qui lui permet de réaliser cette arbitrage. Quand l'individu entre sur le marché du travail, il a une préférence **de base** pour le temps libre qui sera modulée par d'autres caractéristiques comme l'âge ou le genre pour former cette préférence **effective** de l'individu pour le temps libre $\alpha_{i,t}$ (cf. équation 2.2 plus bas).

Cette préférence de base pour le temps libre est tirée suivant une loi normale $\alpha_{base} \sim \text{Max}(0, \mathcal{N}(1, \sigma_{alpha}))$ bornée à 0, avec σ_{alpha} un paramètre exogène fixé⁴.

4. Nous verrons dans le chapitre suivant de calibration du modèle que certains paramètres seront fixés à partir d'études économétriques ou bien suivant des ordres de grandeurs "raisonnables". D'autres paramètres seront calibrés de façon à reproduire des cibles du marché du travail en 2011. Les valeurs de tous les paramètres (fixés et calibrés) seront précisées dans le chapitre suivant.

Le noyau de productivité Le noyau de productivité $kProd_i$ représente les compétences « innées » de l'individu i au travail. Ces compétences « innées »⁵ peuvent être par exemple des aptitudes physiques (sensorielles ou psychomotrices) des aptitudes intellectuelles (intelligence abstraite ou concrète, créativité). Ces compétences seront ensuite modulées par des facteurs d'expériences et par les caractéristiques des postes (notamment le facteur technologique) pour former la production effective d'un individu sur un poste (cf. section 2.3.3.3). Ce noyau de productivité est tiré aléatoirement selon une loi normale :

$$kProd_i \sim \text{Max}(0, \mathcal{N}(1, \sigma_{coreProd})) \quad (2.1)$$

avec $\sigma_{coreProd} \in [0, 1]$ un paramètre exogène calibré.

2.3.1.2 Les variables internes des agents individus

A la différence des attributs spécifiques, les variables internes d'un agent "individu" évoluent au cours de sa vie dans la simulation.

L'âge Un individu a un âge noté age_i compté en semaines et en années. Cet âge évolue au cours de la simulation jusqu'à son décès et sa sortie de la simulation.

La préférence effective pour le temps Le paramètre $\alpha_{i,t} \in [0, 1]$ traduit la préférence pour le temps libre effective de l'individu i au temps t . L'équation de détermination de $\alpha_{i,t}$ s'inspire d'ARTEMIS :

$$\alpha_{i,t} = \text{Min}(0.95, \alpha_0 \times \alpha_{base} \times (1 + \alpha_{old} \times (age - 15)) \times F_w) \quad (2.2)$$

- $\alpha_0 \in [0, 1]$ est un paramètre exogène calibré
- Le terme α_{base} est la préférence de base pour le temps libre de l'individu déterminée au moment de son entrée sur le marché du travail.
- $\alpha_{old} \in [0, 1]$ est un paramètre de sensibilité de la préférence pour le temps libre à l'âge de l'individu. Ce terme exprime la pénibilité du travail qui est croissante avec l'âge et qui est mise en évidence par le rapport (Nicot and Roux, 2008).
- Le terme F_w concerne uniquement les femmes et il est croissant avec le nombre d'enfants :

$$F_w = 1 + \alpha_{child} \times nbChildren \quad (2.3)$$

Avec $\alpha_{child} \in [0, 1]$ un paramètre exogène calibré et $nbChildren$, le nombre d'enfants dans le ménage. Pour une femme de moins de 25 ans ayant des enfants, nous multiplions ce facteur F_w , par un facteur supplémentaire $1 + \alpha_{yw}$ qui traduit une surcharge pour les jeunes mères ayant des enfants en bas âge, avec $\alpha_{yw} \in [0, 20]$ un paramètre exogène calibré.

5. On n'entre pas ici dans un débat entre l'inné et l'acquis. L'idée est que l'on suppose que les individus ont des qualités de base différentes qui les distinguent au moment de leur entrée sur le marché du travail et qui n'évoluent pas ensuite au cours de leur vie professionnelle

Comme dans ARTEMIS, le paramètre $\alpha_{i,t}$ évolue de manière différente pour les hommes et les femmes, notamment dans les ménages avec des enfants. En effet, on constate en France en 2011, des répartitions encore inégales des rôles dans le ménage pour l'éducation des enfants ou les travaux ménagers. D'après l'INSEE, en France en 2011 le taux d'emploi à temps complet des femmes vivant en couple et ayant trois enfants ou plus est de 39,8% contrairement à 87,0% chez les hommes se trouvant dans la même situation (INSEE, 2011k).

Le niveau de qualification courant Le niveau de qualification courant de l'individu (noté q dans la suite) est déterminé aléatoirement au moment de son entrée sur le marché du travail parmi trois niveaux de qualification distincts en reprenant les principales catégories socioprofessionnelles utilisées par l'INSEE (INSEE, 2011). Nous avons cependant fusionné les catégories d'"Employés" et d'"Ouvriers" pour former une catégorie commune d'"Employés/Ouvriers", car nous ne modélisons pas les différents secteurs d'activité, il est donc difficile de distinguer dans le modèle ces deux catégories socioprofessionnelles qui sont par ailleurs caractérisées par des niveaux de chômage et de salaire très voisins.

Donc notre modèle retient trois niveaux de qualification distincts :

- Employés/Ouvriers
- Professions intermédiaires
- Cadres

Le niveau de qualification d'un individu peut ensuite changer au cours de la carrière de l'individu si celui bénéficie d'une promotion, ou si l'individu se décline pour chercher un emploi d'un niveau de qualification inférieur s'il reste trop longtemps au chômage.

Les différents niveaux de capitaux humains Nous reprenons dans WorkSim la notion de capital humain développée par (Becker, 1975). D'après (Généreux, 2001), "le capital humain est l'ensemble des aptitudes, talents, qualifications, expériences accumulés par un individu et qui déterminent en partie sa capacité à travailler ou à produire pour lui-même ou pour les autres". Ce capital humain peut s'acquérir grâce à des formations ou bien grâce à l'expérience au cours de la vie professionnelle. Il peut aussi se perdre par effet de l'oubli des connaissances.

Dans WorkSim, nous modélisons trois types d'aptitudes professionnelles :

- les aptitudes *générales* de l'individu qui sont utiles pour tous les emplois. Ces aptitudes générales sont par exemple des qualités de communication verbale et écrite, la maîtrise d'une langue vivante étrangère, la capacité d'analyse et de résolution de problèmes.
- les aptitudes *relatives* à chacun des trois niveaux de *qualification*. Nous pouvons citer par exemple pour un niveau de qualification de cadre, des compétences en informatique ou bien la capacité à diriger une équipe.
- les aptitudes *spécifiques* à un *poste* en particulier dans une entreprise. Nous supposons que ces aptitudes sont liées à la tâche à réaliser par l'individu sur un poste et ne peuvent pas être utilisées dans le cadre d'un autre poste. Cette aptitude peut par exemple être

la maîtrise d'un logiciel utilisé uniquement pour un type de poste donné dans une entreprise

Ces niveaux d'aptitudes sont respectivement modélisés dans WorkSim par trois niveaux de **capitaux humains** pour un individu i au temps t :

- le capital humain général noté $HC_{i,t}^{gen}$. Nous supposons que ce capital humain général augmente de 1 point chaque semaine passée en emploi. Cette augmentation de 1 point est arbitraire mais son efficacité dépendra d'un facteur β (cf. équation 2.30) qui est calibré pour reproduire l'évolution des salaires sur la carrière des individus par niveau de qualification. Cette augmentation du capital humain correspond au phénomène de *learning by doing*, ou apprentissage au niveau du capital humain général, mis en évidence par (Arrow, 1962), et représente des hausses de compétence sans coût de formation pour les entreprises et les salariés. Ce capital humain peut aussi augmenter si le salarié reçoit une formation à l'embauche par l'entreprise (cf. section 2.6.6). Nous supposons par ailleurs que ce capital diminue d'un pourcentage Lxp pour chaque période passée hors emploi après Txp périodes (effet d'oubli des compétences à cause d'une trop longue période de chômage ou d'inactivité).
- le capital humain pour chaque niveau de qualification q , noté $HC_{i,q,t}^{occ}$. De la même façon ce stock de capital humain augmente de 1 point chaque semaine passée sur un poste du niveau de qualification q , mais diminue d'un pourcentage Lxp pour chaque tick passé après Txp périodes sans occuper de poste à ce niveau de qualification. Comme pour le capital humain général, ce capital humain au niveau de qualification q peut aussi augmenter si le salarié reçoit une formation à l'embauche par l'entreprise. $Lxp \in [0, 0.1]$ et $Txp \in [0, 100]$ sont deux paramètres exogènes calibrés.
- le capital humain spécifique $HC_{i,p,t}^{spec}$ qui modélise les compétences apprises par l'individu dans le poste dans son entreprise. Il s'agit d'une forme d'apprentissage qui porte sur les aspects technologiques et sociaux propres aux caractéristiques du poste. Ce capital humain spécifique correspond à l'ancienneté de l'individu sur le poste p . On notera que si l'individu reçoit une promotion et change de qualification dans l'entreprise, cette ancienneté est réinitialisée à 0. Ce capital humain spécifique peut aussi augmenter si le salarié reçoit une formation à l'embauche par l'entreprise.

Le facteur de condition de l'individu Nous supposons que l'individu est caractérisé par un facteur de forme $cond_{i,t} \in [0, 2]$ au temps t qui a une influence sur son niveau de productivité. Ce facteur de forme modélise le niveau de motivation de l'individu et son état de santé. Au moment de l'entrée de l'individu dans la simulation, ce facteur est initialisé dans l'intervalle $[minC, maxC]$. Il évolue tout au long de sa carrière suivant une marche aléatoire :

$$cond_{i,t+1} = Max(minC, Min(maxC, cond_{i,t} + \mathcal{N}(0, \sigma_C))) \quad (2.4)$$

de façon à conserver toujours : $\forall t, cond_{i,t} \in [minC, maxC]$. $minC$ et $maxC$ sont deux paramètres exogènes fixés et $\sigma_C \in [0, 0.3]$ est un paramètre exogène calibré.

2.3.1.3 Le ménage de l'individu

Dans WorkSim, les agents individus sont regroupés dans des ménages. En effet, nous faisons l'hypothèse comme dans le modèle ARTEMIS que l'évaluation de la situation monétaire de l'individu se fait au niveau de son ménage plutôt qu'à un niveau simplement individuel, car le nombre de personnes à charge ainsi que les revenus du conjoint influencent ses décisions. De plus, la détermination de certaines allocations comme le RSA⁶ nécessite la prise en compte de l'ensemble des revenus d'activité des individus qui composent le ménage. Le changement de situation d'un agent sur le marché du travail peut donc avoir un impact sur celui de son conjoint.

Dans WorkSim, nous retenons 3 principaux états dans un ménage définis par l'INSEE (INSEE, 2011g) :

- Enfant dans un ménage
- Personne seule (avec ou sans enfants)
- En couple (avec ou sans enfants)

Cet état peut changer au cours de la simulation pour un individu. Le module démographique que gère l'évolution de ces ménages sera décrit dans l'annexe E.

2.3.1.4 L'état de l'individu sur le marché du travail

Du point de vue de la modélisation multi-agent, la situation de l'individu sur le marché du travail est représentée avec une machine à états finis⁷. A chaque état sera associé un comportement de l'agent individu qui peut déclencher une transition pour passer d'un état à un autre. L'implémentation de machine à états finis est mise en oeuvre dans le domaine de la simulation multi-agent pour définir des comportements complexes d'agent qui interagissent dans un environnement dynamique (voir par exemple (Sakellariou, 2012) ou (Gnilomedov et Nikolenko, 2010)).

Le modèle WorkSim évolue en population fermée et tous les principaux états sur le marché du travail des individus en âge de travailler d'un pays sont modélisés en suivant la classification de l'INSEE (INSEE, 2011). Un individu peut être dans 8 états différents sur le marché du travail :

- Chômeur : sans emploi et à la recherche d'un emploi au sens du Bureau International du Travail (BIT)⁸
- Inactif : sans emploi et non à la recherche d'un emploi qui n'est pas étudiant, ni retraité
- Etudiant
- Retraité
- Salarié du secteur privé non à la recherche d'un autre emploi (PAE)

6. Revenu de solidarité active

7. *finite-state machine* (FSM)

8. personne en âge de travailler (conventionnellement 15 ans ou plus) qui : 1/ n'a pas travaillé au cours de la semaine de référence ; 2/ est disponible pour travailler dans les deux semaines et 3/ a entrepris des démarches effectives de recherche d'emploi ou a trouvé un emploi qui commence dans les trois mois

- Salarié du secteur privé à la recherche d'un autre emploi, noté PARAE dans la suite pour **P**ersonne **A** la **R**echerche d'un **A**utre **E**mplacement.
- Fonctionnaire
- Dirigeant d'une entreprise privée

Les passages entre les états peuvent être occasionnés par des choix de l'individu (démissionner, commencer une recherche d'emploi,...), par des événements subis qui résultent de décisions prises par les entreprises (licenciement, recrutement...) ou bien par des mécanismes exogènes du modèle (entrée dans l'état d'étudiant, dans l'état de fonctionnaire,...).

Le diagramme d'états est présenté sur le schéma 2.3.

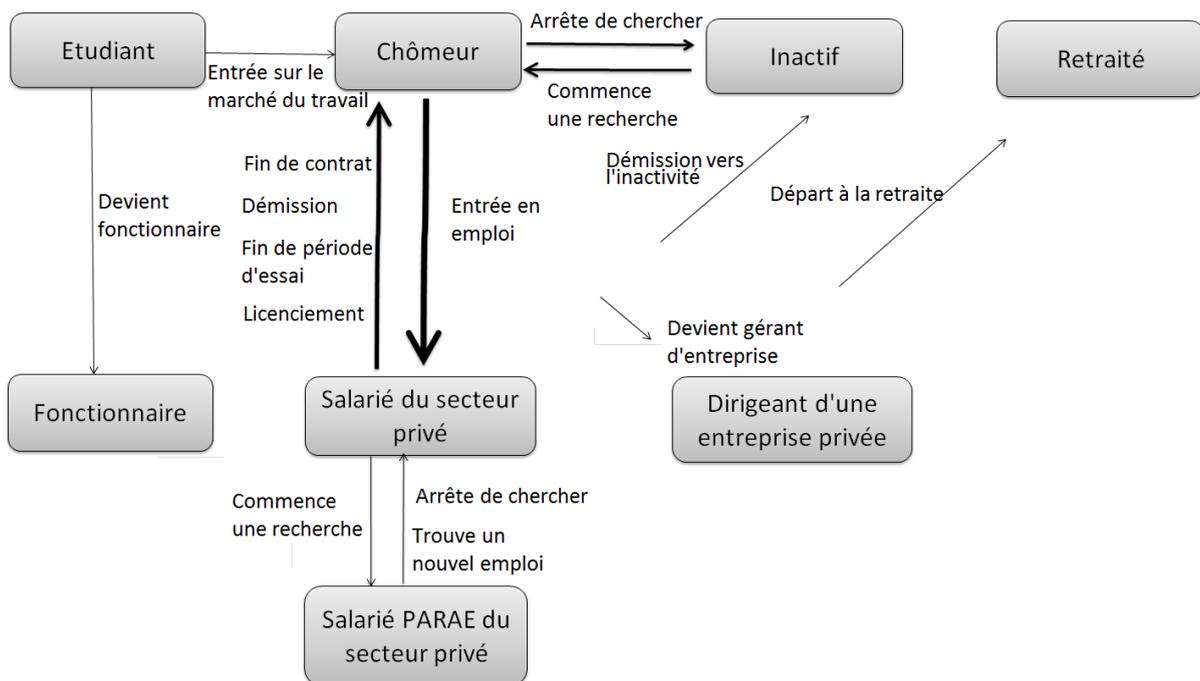


FIGURE 2.2 – Diagramme d'états des individus

Ces mécanismes de passage d'un état à l'autre seront décrits dans la section 2.6.5.

2.3.1.5 Schéma récapitulatif de l'agent "individu" dans WorkSim

Le schéma récapitulatif de l'agent "individu" est présenté sur la Figure 2.3.

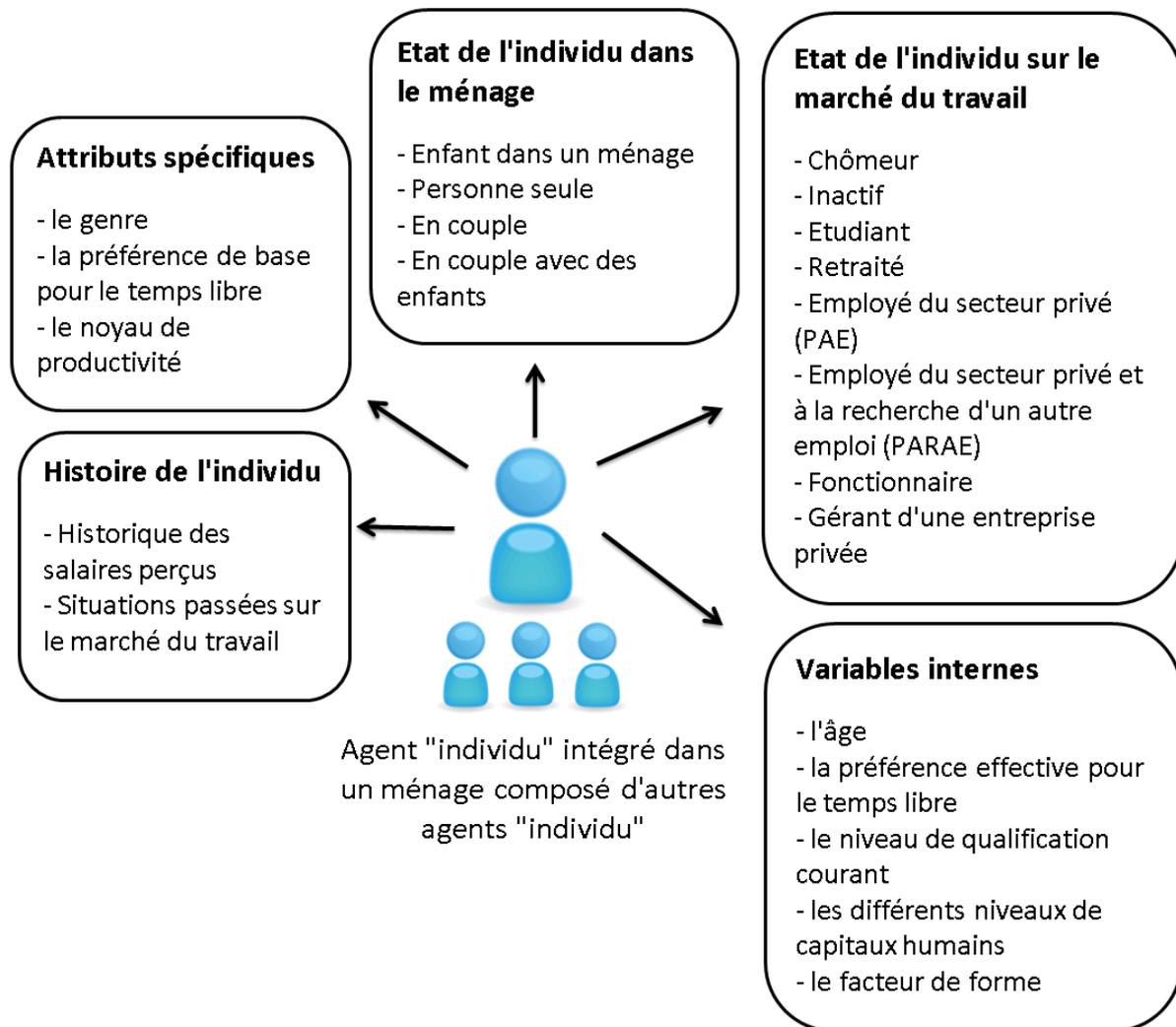


FIGURE 2.3 – Schéma d'un agent *individu* dans WorkSim

2.3.2 Modélisation d'un agent "entreprise privée"

Sur le marché du travail, les agents "individu" sont du côté de l'offre. Nous introduisons maintenant les agents "entreprise privée", du côté de la demande de travail. Il est en effet primordial de modéliser les deux côtés du marché du travail et d'avoir un modèle complet pour étudier l'effet de politiques publiques. Nous verrons que les décisions des entreprises et la façon dont elles créent des postes et gèrent leur main d'œuvre ont une influence forte sur la situation des agents "individu" sur le marché du travail.

Dans le modèle WorkSim, les agents "entreprise privée" correspondent à une mise à l'échelle du secteur privé français en 2011.

Au temps t , chaque entreprise notée j par la suite possède une liste de $np_{j,q,t}$ postes de salarié par niveau de qualification q , "Employés/Ouvriers", "Professions intermédiaires" et "Cadres" (cf. section 2.3.1.2). Cette liste est notée $(p_{q,1}, \dots, p_{q,np_{j,q,t}})$. L'entreprise possède en

plus un poste spécifique de dirigeant noté p_0 .

A chacun de ces postes peuvent être affecté un contrat c et éventuellement un salarié i si le poste est pourvu. Nous distinguons dans le modèle le poste, le contrat et le salarié.

Cette distinction est importante car elle permet de modéliser de façon distincte les flux de création d'emploi et les flux d'entrée des individus sur le marché du travail. Elle permet de reproduire un fait stylisé du marché du travail mis en évidence par (Abowd *et al.*, 1999), à savoir que les flux de travailleurs sont beaucoup plus importants que ceux des emplois, car de nombreux travailleurs peuvent se succéder sur un même emploi.

Ainsi, dans notre modèle, l'individu affecté à un poste de l'entreprise peut changer. Par exemple, si un individu démissionne d'un poste, il pourra éventuellement être remplacé par un autre individu alors que le poste est maintenu. L'entreprise peut aussi décider de changer le contrat affecté à un poste pour un même salarié au cours de sa carrière.

L'entreprise j possède une liste de $ne_{j,q,t}$ salariés par niveau de qualification q (avec donc $\forall q \forall t, ne_{j,q,t} \leq np_{j,q,t}$ car tous les postes ne sont pas pourvus). Cette liste est notée $(e_{q,1}, \dots, e_{q,ne_{j,q,t}})$. Ces salariés sont des agents *individus* de la simulation présentés dans la section précédente. Ils occupent chacun un poste parmi la liste des postes de salariés de l'entreprise. L'entreprise possède en plus toujours un dirigeant qui occupe le poste p_0 et qui est aussi agent *individu* du modèle.

Les listes de postes et de salariés ne sont pas figées. Au cours de la simulation l'entreprise peut décider d'ouvrir des postes pour augmenter son activité ou bien en détruire s'ils ne sont plus rentables. De la même façon, l'entreprise peut recruter de nouveaux salariés ou bien s'en séparer. Ces décisions seront présentées dans la section 2.6.

Les agents "entreprise privée" sont hétérogènes et sont caractérisés par :

1. des attributs spécifiques. Comme les agents *individus*, les firmes possèdent des caractéristiques propres déterminées au moment de leur création qui n'évoluent pas au cours de la simulation
2. des variables internes
3. un état qui correspond à la situation financière générale de l'entreprise et qui a un impact sur ses décisions.
4. une histoire. Les agents "entreprise privée" conservent une trace de leurs situations passées.
5. une liste de postes. Chacun de ces postes a ses propres attributs spécifiques, des variables internes et un état (voir section 2.3.3). Sur ces postes, l'entreprise peut affecter des contrats et embaucher des agents "individu" du modèle.

2.3.2.1 Les attributs spécifiques des agents *entreprise privée*

Production horaire de base des postes de l'entreprise par niveau de qualification La production horaire de base $QH_{j,q}^{base}$ exprimée en unité de bien représente le facteur technologique des postes de l'entreprise.

Cette production horaire de base du niveau de qualification q est tirée aléatoirement au moment de la création de l'entreprise suivant :

$$QH_{j,q}^{base} = \text{Max}(0, \mu_q \times \mathcal{N}(1, \sigma_q)) \quad (2.5)$$

avec $\forall q \in \llbracket 1, 3 \rrbracket, \mu_q \in [0, 100]$ des paramètres exogènes calibrés et σ_q un paramètre fixé. Notre économie évoluant en état stationnaire, nous supposons que ce facteur technologique est constant au cours du temps.

Salaire de base des postes par niveau de qualification Chaque unité de production de l'entreprise est vendue au prix fixe P (1 euro) et nous supposons que le salaire de base du poste est déterminé en fonction de la productivité de base en valeur du poste.

Le salaire horaire de base $SH_{j,q}^{base}$ de l'ensemble des postes du niveau de qualification q de l'entreprise j est donné par :

$$SH_{j,q}^{base} = QH_{j,q}^{base} \times P \times (1 - \zeta) \quad (2.6)$$

Avec $\zeta \in [0, 1]$ un paramètre exogène calibré qui représente la part prise par la firme sur la production en valeur de ses salariés. Nous supposons que ce paramètre n'est pas choisi par la firme et qu'il est identique pour toutes les firmes. Il reflète un état de la société : rapport de force entre patronat et syndicats de salariés, niveau des impôts et part de l'État dans la fourniture des biens (enseignement payant ou gratuit, système médical...).

Aménité des postes dans l'entreprise par niveau de qualification Le niveau d'aménité des postes de l'entreprise regroupe l'ensemble des caractéristiques non monétaires de l'emploi (reconnaissance sociale, ambiance de travail dans l'entreprise, etc.). Avec le salaire et le temps de travail, c'est un facteur que les individus vont prendre en compte pour évaluer l'utilité d'un poste (cf. section 2.5.1).

Ce niveau d'aménité horaire est tiré aléatoirement au moment de la création de l'entreprise pour chaque niveau de qualification q suivant la loi :

$$AH_{j,q} = \mathcal{N}(0, \sigma_A \times SH_{j,q}^{base}) \quad (2.7)$$

Avec σ_A un paramètre exogène fixé. Ce niveau d'aménité peut donc être positif comme négatif.

Contrairement au salaire qui est affiché (cf. section 2.3.3.4) et qui est connu par un candidat à l'emploi pour sa recherche, le niveau d'aménité dans l'entreprise lui est inconnu. Cette aménité ne lui sera pleinement révélée qu'au moment de son embauche. Ce facteur d'aménité présente un intérêt à la fois théorique et empirique, celui de conduire un employé à rechercher un autre emploi s'il est déçu de ce niveau d'aménité. Ceci explique une partie des démissions rapides après embauche.

Organisation spécifique de l'entreprise Nous supposons que chaque entreprise a une organisation spécifique. Pour répondre à sa demande globale $D_{j,t}$, elle a des besoins de main

d'œuvre pour chaque niveau de qualification q :

$$D_{j,q,t} = D_{j,t} \times \Psi_{j,q} \quad (2.8)$$

avec $\Psi_{j,q}$, la part de la demande totale de l'entreprise j affectée au niveau de qualification q . Cette part $\Psi_{j,q}$ est tirée aléatoirement au moment de la création de l'entreprise :

$$\Psi_{j,q} = \text{Max}(0, \mathcal{N}(\mu_{\Psi_q}, \sigma_{\Psi})) \quad (2.9)$$

Chaque part $\Psi_{j,q}$ est ensuite normalisée : $\forall q \in \llbracket 1, 3 \rrbracket, \Psi_{j,q} = \frac{\Psi_{j,q}}{\sum_{q=1}^3 \Psi_{j,q}}$.

2.3.2.2 Les variables internes des agents "entreprise privée"

Part de marché et évolution de la demande des entreprises La part de marché de l'entreprise j à t est donnée par :

$$MS_{j,t} = \frac{D_{j,t}}{D_{tot}} \quad (2.10)$$

avec $D_{j,t}$, la demande de l'entreprise et D_{tot} la demande totale pour l'ensemble des entreprises.

Nous supposons que la répartition de cette demande globale varie entre les firmes. Pour cela nous appliquons un choc stochastique sur la variable part de marché de chacune des firmes et à chaque période (marche aléatoire).

$$\forall t, MS_{j,t} = \text{Max}(0, MS_{j,t-1} \times (1 + \mathcal{N}(\mu_{MS,j,t}, \sigma_{MS,j,t}))) \quad (2.11)$$

avec $\mu_{MS,j,t}, \sigma_{MS,j,t}$ des facteurs de tendance et d'aléa de cette part de marché propre à chaque entreprise et qui lui sont inconnus. Ces coefficients $\mu_{MS,j,t}, \sigma_{MS,j,t}$ sont modifiés de façon aléatoire tous les ans pour chaque entreprise suivant :

$$\mu_{MS,j,t+52} = \mu_{MS,j,t} + \mathcal{N}(0, \mu_{alea}) \quad (2.12)$$

$$\sigma_{MS,j,t+52} = \sigma_{MS,j,t} + \mathcal{N}(0, \sigma_{alea}) \quad (2.13)$$

avec toujours $\mu_{MS,j,t} \in [-\mu_{max}, +\mu_{max}]$ et $\sigma_{MS,j,t} \in [0, +\sigma_{max}]$. $\mu_{alea}, \sigma_{alea}, \mu_{max}$ et σ_{max} sont des paramètres exogènes calibrés. $\mu_{alea} \in [0, 0.1], \sigma_{alea} \in [0, 0.1], \mu_{max} \in [0, 0.3], \sigma_{max} \in [0, 0.3]$. La première date de réévaluation des coefficients $\mu_{MS,j,t}$ et $\sigma_{MS,j,t}$ pour une entreprise est tirée aléatoirement puis les réévaluations ont lieu tous les ans à partir de cette date.

La demande de chaque entreprise j est recalculée à chaque période suivant l'évolution de cette part de marché (eq. 2.11) :

$$D_{j,t} = \frac{MS_{j,t}}{\sum_{k=1}^{Ne} MS_{k,t}} \times D_{tot} \quad (2.14)$$

N_e est le nombre de firmes dans le modèle. Cette équation de calcul de la demande de chaque entreprise permet de conserver une somme des demandes des entreprises toujours égale à D_{tot} .

La demande de l'entreprise pour chaque niveau de qualification dépend ensuite de son organisation :

$$D_{j,q,t} = D_{j,t} \times \Psi_{j,q} \quad (2.15)$$

Le revenu de l'entreprise A chaque pas du temps t , nous faisons l'hypothèse que chaque entreprise j avec $ne_{j,q,t}$ salariés par niveau de qualification q au temps t ne peut vendre plus d'unités de biens que la quantité demandée $D_{j,q,t}$ et que sa production $Q_{j,q,t}^{eff}$ par niveau de qualification.

Le bien est produit avant que l'entreprise ne connaisse sa demande, de sorte que celle-ci paie les salaires et autres charges même si le bien n'est pas vendu. Le bien ne peut être stocké et un excès d'offre est donc perdu.

Selon ce modèle, le chiffre d'affaires de l'entreprise j au temps t est donc donné par :

$$R_{j,t}^{eff} = P \times \sum_{q=1}^3 \min(Q_{j,q,t}^{eff}, D_{j,q,t}) \quad (2.16)$$

La production de l'entreprise Nous supposons qu'un salarié du niveau de qualification q ne peut produire qu'à ce niveau de qualification. En revanche, de façon à modéliser la production des très petites entreprises et surtout celles n'ayant aucun salarié et dans lesquelles l'unique producteur est le dirigeant qui assure à lui seul l'ensemble des tâches à accomplir, nous supposons que le dirigeant produit à chacun des trois niveaux de qualification, afin de répondre à la demande dans les 3 niveaux de qualification.

La production $Q_{j,q,t}^{eff}$ au niveau de qualification q est donc la somme de chacune des productions $Q_{i,j,p,q,t}^{eff}$ des salariés $i = 1..ne_{j,q,t}$ de l'entreprise j du niveau de qualification q au temps t , à laquelle nous ajoutons une part de la production du dirigeant $Q_{0,j,q,t}^{eff}$ au niveau de qualification q (nous indiquons par l'indice 0, l'individu dirigeant de l'entreprise) :

$$\forall q, Q_{j,q,t}^{eff} = \sum_{i=1}^{ne_{j,q,t}} Q_{i,j,p,q,t}^{eff} + Q_{0,j,q,t}^{eff} \quad (2.17)$$

La calcul de la production $Q_{i,j,p,q,t}^{eff}$ d'un salarié i sur un poste p du niveau de qualification q sera précisé dans la section 2.3.3 (équation 2.30)

Les coûts de l'entreprise L'entreprise produit et vend des biens, donc génère un revenu, mais a aussi des coûts. Ces coûts sont des salaires avec des charges salariales à verser aux salariés et au dirigeant à chaque période dans le modèle.

Le coût global de l'entreprise est donc :

$$C_{j,t}^{eff} = \sum_{i=1}^{n_j} C_{i,j,p,q,t}^{eff} \quad (2.18)$$

où $C_{i,j,p,q,t}^{eff}$ est le coût effectif de l'individu i dans l'entreprise j au temps t et n_j est le nombre total d'individus dans l'entreprise (salariés et dirigeant de l'entreprise).

La calcul du coût $C_{i,j,p,q,t}^{eff}$ d'un salarié i sur un poste p du niveau de qualification q sera précisé dans la section 2.3.3 (équation 2.27)

Le profit de l'entreprise Le profit global de l'entreprise au temps t est la différence entre ses revenus et ses coûts :

$$\Phi_{j,t}^{eff} = R_{j,t}^{eff} - C_{j,t}^{eff} \quad (2.19)$$

2.3.2.3 L'état de l'entreprise

Tous les ans l'entreprise fait un bilan de sa situation financière. La première date du bilan est tirée de manière aléatoire, puis les bilans ont lieu tous les ans à partir de cette date. L'entreprise calcule son revenu annuel $R_{j,t}^{bilan}$ et son coût annuel $C_{j,t}^{bilan}$ (somme des profits et des coûts par période depuis un an), et en déduit son rendement $\frac{R_{j,t}^{bilan} - C_{j,t}^{bilan}}{C_{j,t}^{bilan}}$. Une entreprise peut être dans 3 états possibles, susceptibles d'influencer son comportement :

- *En perte* si $\frac{R_{j,t}^{bilan} - C_{j,t}^{bilan}}{C_{j,t}^{bilan}} < -PT$
- *Neutre* si $-PT < \frac{R_{j,t}^{bilan} - C_{j,t}^{bilan}}{C_{j,t}^{bilan}} < PT$
- *En bénéfice* si $\frac{R_{j,t}^{bilan} - C_{j,t}^{bilan}}{C_{j,t}^{bilan}} > PT$

$PT \in [0, 1]$ est un paramètre exogène calibré.

2.3.2.4 L'histoire de l'entreprise

Historique de la demande L'entreprise conserve en mémoire un historique de sa demande $D_{j,t}$ sur la dernière année. Cet historique sera utilisé par l'entreprise pour estimer les facteurs d'évolution de sa demande future afin de faire des anticipations (voir section 2.5.2.4).

Historique des durées des contrats L'entreprise conserve en mémoire la durée des contrats qui ont été résiliés depuis les 3 dernières années afin d'estimer la durée moyenne des contrats qu'elle peut créer.

Historique des durées des postes vacants L'entreprise conserve en mémoire les durées des postes vacants qui se sont achevés pendant les 3 dernières années. Cet historique permet à l'entreprise d'estimer la durée moyenne de vacance des postes qu'elle propose (voir section 2.5.2.3).

2.3.2.5 Schéma récapitulatif de l'agent "entreprise privée"

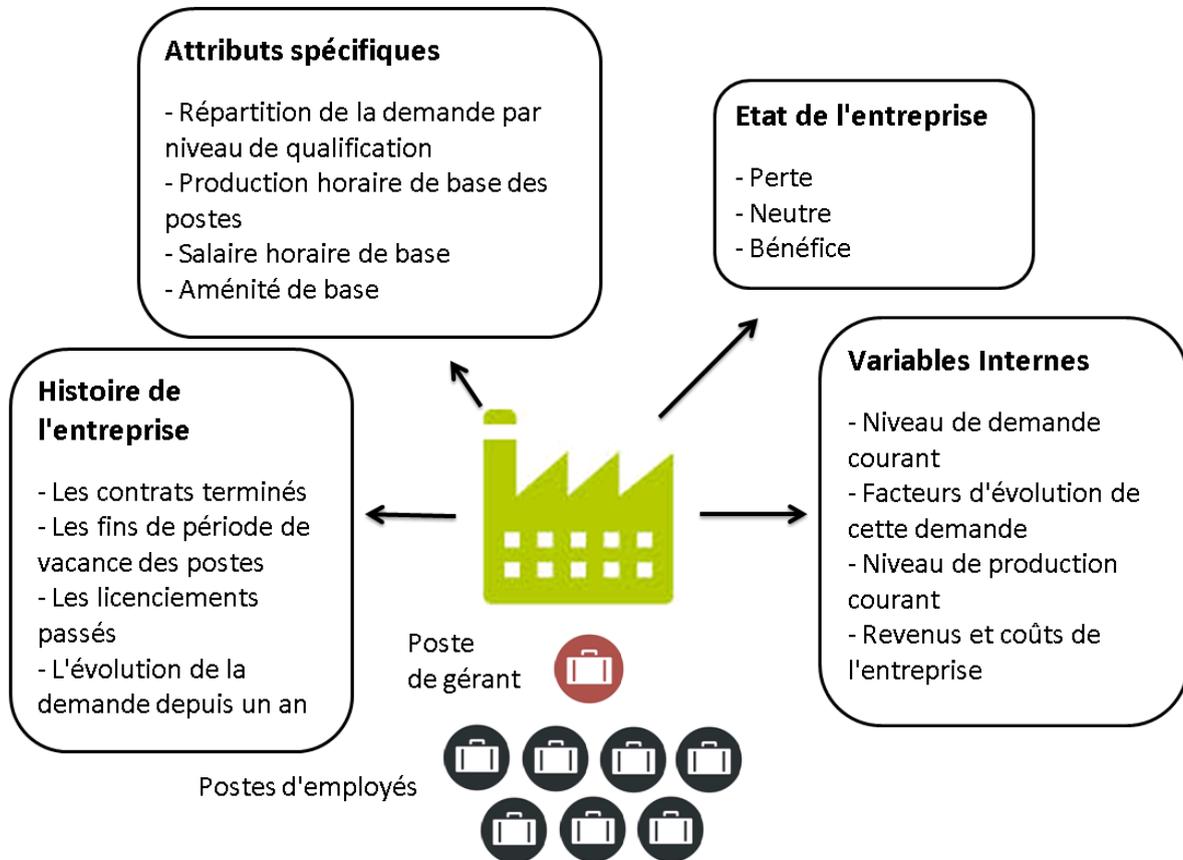


FIGURE 2.4 – Schéma d'un agent *entreprise privée* dans WorkSim

2.3.3 Modélisation d'un poste de l'entreprise

Chaque poste d'une entreprise est un objet du modèle qui possède ses propres caractéristiques. Les postes d'une entreprise sont hétérogènes et sont caractérisés par :

1. des attributs spécifiques déterminés au moment de leur création
2. des variables internes qui évoluent au cours de la simulation
3. un état : *en attente*, *vacant* ou *pourvu*
4. une histoire. Un historique des productions passées du salarié sur le poste est conservé en vu d'un bilan annuel.

2.3.3.1 Attributs spécifiques des postes de l'entreprise

Un poste possède 6 attributs propres qui sont déterminés au moment de sa création par l'entreprise :

- un niveau de qualification q parmi les 3 niveaux de qualification distincts : "Employé/Ouvrier", "Professions Intermédiaires", "Cadres".
- un vecteur de capitaux humains requis ($HC_{Req,p}^{spec}$, $HC_{Req,p}^{gen}$, $HC_{Req,p,q}^{occ}$) qui représente les niveaux de compétences minimales requises pour pouvoir effectuer la tâche associée au poste. $HC_{Req,p}^{spec}$ est le capital humain spécifique requis, $HC_{Req,p}^{gen}$ est le capital humain général requis et $HC_{Req,p,q}^{occ}$ est le capital humain requis de la qualification q du poste. Ces capitaux humains sont tirés aléatoirement au moment de la création du poste suivant des distributions uniformes dans les intervalles $[0, MaxHCspec_{Req}]$, $[0, MaxHCgeneral_{Req}]$ et $[0, MaxHCocc_{Req}]$. $MaxHCspec_{Req}$, $MaxHCgeneral_{Req}$ et $MaxHCocc_{Req}$ sont des paramètres calibrés dans l'intervalle $[0, 10000]$.
- un nombre d'heures par semaine requis HpW_p sur le poste. Nous supposons que ce nombre d'heures requis par semaine n'est pas choisi *ex ante* par l'entreprise : il est imposé par la nature la de tâche associée au poste. Ce nombre d'heures par semaine est tiré aléatoirement au moment de la création du poste. Le poste a une probabilité $PrMid$ d'être à mi-temps et une probabilité $(1 - PrMid)$ d'être à temps plein. $PrMid \in [0, 1]$ est un paramètre exogène calibré. Le nombre moyen d'heures travaillées par semaine pour un temps plein en 2011 est de 39.6h et de 23.2h pour un mi-temps d'après (DARES, 2013a) et (DARES, 2013b).
- une production de base par semaine $Q_{j,p,q}^{base}$ qui représente le facteur technologique du poste. Nous supposons que tous les postes d'un même niveau de qualification q ont le même facteur technologique $QH_{j,q}^{base}$ qui est spécifique à l'entreprise et que la production de base hebdomadaire d'un poste est directement proportionnelle au nombre d'heures travaillées par semaine sur le poste. Donc :

$$Q_{j,p,q}^{base} = QH_{j,q}^{base} \times HpW_p \quad (2.20)$$

- De même le salaire de base hebdomadaire du poste correspond au salaire de base horaire du niveau de qualification q de l'entreprise multiplié par le nombre d'heures de travail par semaine sur le poste : $S_{j,p,q}^{base} = SH_{j,q}^{base} \times HpW_p$.

- Le niveau d'aménité hebdomadaire de base du poste correspond à l'aménité de base horaire du niveau de qualification q de l'entreprise multipliée par le nombre d'heures par semaine du poste : $A_{j,p,q} = AH_{j,q} \times HpW_p$.

2.3.3.2 Variables internes des postes

2.3.3.3 Productivité effective d'un poste de salarié

Les caractéristiques du salarié viennent moduler la productivité de base du poste (correspondant à des caractéristiques techniques du poste) pour constituer sa productivité effective. On fait l'hypothèse que la productivité horaire du poste n'est pas affectée par le type de contrat du poste (par exemple, un individu en contrat CDD produit autant que ce même individu en contrat CDI).

La production effective $Q_{i,j,q,t}^{eff}$ d'un salarié i de l'entreprise j au niveau de qualification q sur le poste p et au temps t dépend :

- du niveau de productivité hebdomadaire de base du poste $Q_{j,p,q}^{base}$
- de $kProd_i$, le noyau de productivité de l'individu i , qui représente les compétences "innées" de l'individu (cf. section 2.3.1.1).
- de $cond_{i,t}$, le facteur de condition de l'individu i , qui représente son niveau de motivation et d'implication dans son travail.
- des compétences acquises de l'individu modélisées par 3 niveaux de capitaux humains : le capital humain général $HC_{i,t}^{gen}$, le capital humain de l'individu dans le niveau de qualification du poste $HC_{i,q,t}^{occ}$ et le capital humain de l'individu spécifique au poste $HC_{i,p,t}^{spec}$ (cf. section 2.3.1.2)

L'équation globale qui donne la production effective d'un individu est la suivante :

$$Q_{i,j,p,q,t}^{eff} = Q_{j,p,q}^{base} \times kProd_i \times cond_{i,t} \times F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \times F_{\lambda}(HC_{i,p,t}^{spec}) \quad (2.21)$$

On note :

$$F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) = 1 + \beta \times HC_{i,t}^{gen} - \beta' \times (HC_{i,t}^{gen})^2 + \beta_q \times HC_{i,q,t}^{occ} - \beta'_q \times (HC_{i,q,t}^{occ})^2 \quad (2.22)$$

et

$$F_{\lambda}(HC_{i,p,t}^{spec}) = 1 + \lambda \times HC_{i,p,t}^{spec} - \lambda' \times (HC_{i,p,t}^{spec})^2 \quad (2.23)$$

Avec $\beta, \beta', \beta_q, \beta'_q, \lambda$ et λ' des paramètres exogènes de sensibilité aux capitaux humains, calibrés dans l'intervalle $[0, 0.1]$.

Cette formulation de la production effective d'un employé repose sur l'hypothèse d'une complémentarité entre trois facteurs : premièrement la productivité de base du poste qui correspond à un niveau technologique et au temps travaillé, deuxièmement les caractéristiques productives générales de l'employé (noyau de productivité et capital humain général), troisièmement le capital humain spécifique de l'individu dans le poste qu'il occupe. Ces complémentarités sont fondées sur les résultats d'études économiques. La complémentarité

entre niveau technologique d'un poste (lié au capital physique implicite associé) et niveau de capital humain utilisé est montrée dans de nombreuses études (voir par exemple (Nejat et Sanli, 1999)). La complémentarité de performance entre capital humain général et capital humain spécifique a le fondement théorique suivant : le capital humain général d'un individu lui permet de mieux utiliser ses connaissances spécifiques ((Ballot et Taymaz, 1997) et (Acemoglu et Pischke, 1998)).

Nous choisissons des facteurs de sensibilité F_β et F_λ sous la forme de fonctions concaves de type $F(x) = 1 + ax - bx^2$, avec $a > 0$, $b > 0$ et $b \ll a$, de façon à introduire un rendement décroissant mais toujours positif de chaque type de capital humain sur la productivité du salarié⁹. Ce rendement décroissant est observé par exemple dans l'étude de (Befly *et al.*, 2006) pour la France.

2.3.3.4 Salaire hebdomadaire d'un employé sur un poste

Dans l'implémentation, nous choisissons d'attribuer cette variable de salaire au poste, mais indirectement, c'est aussi une variable associée à l'état de *salarié* de l'agent "individu" qui occupe le poste (cf. section 2.6.5).

Nous supposons que le salaire d'embauche $S_{i,j,p,q,t}^{eff}$ d'un salarié i dans l'entreprise j au niveau de qualification q sur le poste p dépend :

- du salaire hebdomadaire de base $S_{j,p,q}^{base}$ du poste
- du $F_\beta(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ})$ qui définit une grille de salaire en fonction du niveau de capital humain ou d'expérience professionnelle de l'individu, comme il est courant dans la réalité.

C'est ce même facteur qui apparaît dans l'équation d'évolution de la productivité du salarié (équation 2.30). Le fait d'avoir le même facteur permet de modéliser un effet semblable du capital humain général et de l'expérience sur le salaire avec un rendement décroissant qui est aussi observé sur les niveaux de salaire par âge et par niveau de qualification (Befly *et al.*, 2006).

- du facteur $F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec})$, le facteur de gain de productivité lié à son expérience acquise sur le poste qui se répercute sur son salaire. On suppose ici que l'entreprise répercute seulement une part des gains de productivité liés au capital humain spécifique sur le salaire, donc

$$F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec}) = 1 + S_\lambda^* \times (\lambda \times HC_{i,p,t}^{spec} - \lambda' \times (HC_{i,p,t}^{spec})^2) \quad (2.24)$$

avec $S_\lambda^* \in [0, 1]$, un paramètre exogène calibré de part de l'accroissement de la productivité lié au capital humain spécifique qui se répercute sur les salaires

- de $G(U_{q,t=crea})$, un facteur d'influence du taux de chômage du niveau de qualification q sur la détermination du salaire au moment de la création d'une offre d'emploi pour ce poste par l'entreprise :

$$G(x) = k_q \times x^\omega \quad (2.25)$$

9. $F'(x) = a - 2bx$. $\forall x \in [0, \frac{a}{2b}]$, $F'(x) > 0$ et la fonction F' est décroissante sur cet intervalle.

ω est un paramètre exogène fixé. $U_{q,t=crea}$ est le taux de chômage pour les individus du niveau de qualification q au moment de la création d'une offre d'emploi pour ce poste¹⁰.

On pose $k_q = (\frac{1}{U_{q,ref}})^\omega$, avec $U_{q,ref}$ le taux de chômage au niveau de qualification q pour l'année de référence étudiée, de telle sorte que $G(U_{q,ref}) = 1$.

On suppose que cette relation G est isoélastique. Elle permet d'introduire une relation positive à élasticité constante entre le taux de chômage sur le marché du travail et le niveau des salaires d'embauche (de type "wage curve") (Blanchflower et Oswald, 1994).

Le salaire à l'embauche est donné par :

$$S_{i,j,p,q,t}^{eff} = \text{Max}(SMIC, S_{j,p,q}^{base} \times F_\beta(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \times F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec}) \times G(U_{q,t=crea})) \quad (2.26)$$

Avec $SMIC$, le salaire minimum horaire en France en 2011.

Avec cette équation 2.26, le salaire d'un individu ne dépend pas du noyau de productivité de l'individu $kProd_i$, ni de son facteur de forme $cond_{i,t}$. La théorie du salaire d'efficience (Akerlof, 1984) nous indique que la différenciation serait contreproductive, source de perception d'iniquité et de comportements hostiles. Dans la réalité la différenciation existe, mais elle repose sur des critères supplémentaires, qui correspondent à la différenciation entre postes d'une même qualification (productivité de base, exigence d'un niveau de capital humain minimum, pénibilité, responsabilité, etc) qui n'existent pas dans la version du modèle présentée ici.

Sur le plan de la cohérence théorique, il est nécessaire de choisir l'option d'un salaire *posté* et non d'un salaire *négocié* en fonction de la qualité attendue de l'appariement et donc du surplus. La théorie des appariements choisit en général cette dernière option (par exemple dans le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994)), mais la théorie de la recherche comporte l'hypothèse d'un affichage des salaires offerts par les entreprises, qui conduit les chercheurs d'emplois à repérer les emplois qui les intéressent et à candidater (ou non). Nous raffinons l'offre de salaire en la remplaçant par une échelle qui dépend de l'expérience de l'individu sur le marché du travail et sur le poste avec les facteurs $F_\beta(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ})$ et $F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec})$, ce qui paraît fréquent dans la réalité.

Augmentation annuelle du salaire hebdomadaire et rigidité des salaires des individus déjà en poste.

Le salaire hebdomadaire d'un individu i dans l'entreprise j est réévalué chaque année, à sa date d'anniversaire dans l'entreprise, suivant cette même équation 2.26, toujours avec le même facteur $G(U_{q,t=crea})$ déterminé au moment de la création de l'offre d'emploi qui n'est plus modifié ensuite pour un individu déjà en poste.

Le facteur d'influence du taux de chômage $G(U_{q,t})$ affecte donc seulement le niveau de salaire des nouveaux entrants sur le marché du travail. Pour les salariés déjà en poste, nous supposons que le salaire ne baisse jamais et n'est pas influencé par une baisse de la productivité de l'individu ou par un choc macroéconomique. Cette hypothèse de rigidité des salaires est

10. Le taux de chômage $U_{q,t}$ au temps t pour les individus du niveau de qualification q est le rapport entre le nombre de chômeurs au temps t du niveau de qualification q (qui occupait un emploi à ce niveau de qualification avant d'être au chômage) divisé par le nombre d'actifs (individu en emploi et chômeur) de ce même niveau de qualification

vérifiée par (Biscourp *et al.*, 2005) dans le cas de la France avec des données à la fin des années 90, si on n'incorpore pas les primes. Les auteurs montrent cependant qu'il existe quand même une baisse possible des salaires des individus déjà en poste en France en tenant compte de ces primes, mais la modélisation fine d'une rémunération variable dépasse pour l'instant le cadre de notre modèle.

Par ailleurs, cette rigidité est nominale, mais aussi réelle car le prix dans notre économie est supposé fixe. Il n'y a pas d'inflation.

2.3.3.5 Coût effectif d'un salarié sur un poste

Le coût effectif d'un salarié i dans l'entreprise j au temps t s'écrit $C_{i,j,p,q,t}^{eff}$. Il comprend son salaire $S_{i,j,p,q,t}^{eff}$ plus une part de charges sociales :

$$C_{i,j,p,q,t}^{eff} = S_{i,j,p,q,t}^{eff} \times (1 + BenC) \times (1 + SalC) \quad (2.27)$$

$SalC$ est le pourcentage de charges sociales salariales et $BenC$ est le pourcentage de charges sociales supportées par l'employeur par rapport au salaire brut (cf. annexe A pour le calcul de ces charges en France en 2011).

2.3.3.6 Coûts de maintien des postes vacants de l'entreprise

Le maintien d'un poste dans l'état *vacant* représente un coût pour l'entreprise (coût de publication de l'offre d'emploi, coût des entretiens de recrutement). Ce coût est exprimé en pourcentage du salaire de base du niveau de qualification du poste et dépend du type de contrat affecté au poste :

$$VacC_{j,p,t} = PrCVac_c \times S_{j,p,q}^{base} \quad (2.28)$$

Avec $PrCVac_c$, le pourcentage que coûte le maintien d'un poste vacant avec un contrat c par rapport au salaire de base.

2.3.3.7 État d'un poste

Un poste d'une entreprise peut être être dans 3 états différents : *pourvu*, *vacant* ou *en attente* :

- un poste dans l'état *en attente* est un poste de l'entreprise pour lequel il n'y a pas d'offre d'emploi rendue publique, ni encore de contrat associé.
- un poste dans l'état *vacant* correspond à une offre d'emploi publiée. Un contrat est associé au poste, mais il n'y a pas d'individu qui travaille sur le poste
- un poste dans l'état *pourvu* est un poste sur lequel est affecté un individu i avec un contrat CDD ou CDI. L'individu travaille et fournit une quantité de production notée $Q_{i,j,p,q,t}^{eff}$. En contrepartie l'entreprise doit payer un coût salarial $C_{i,j,p,q,t}^{eff}$

Les passages entre ces états peuvent être occasionnés par des choix de de l'entreprise (par exemple créer un contrat pour un poste et publier une offre d'emploi, recruter un employé...)

ou bien des événements subis qui résultent des décisions des individus du modèle (démission d'un employé), ou bien des mécanismes exogènes (départ à la retraite d'un employé qui quitte le poste). Le diagramme d'états des emplois est présenté sur la figure 2.5 :

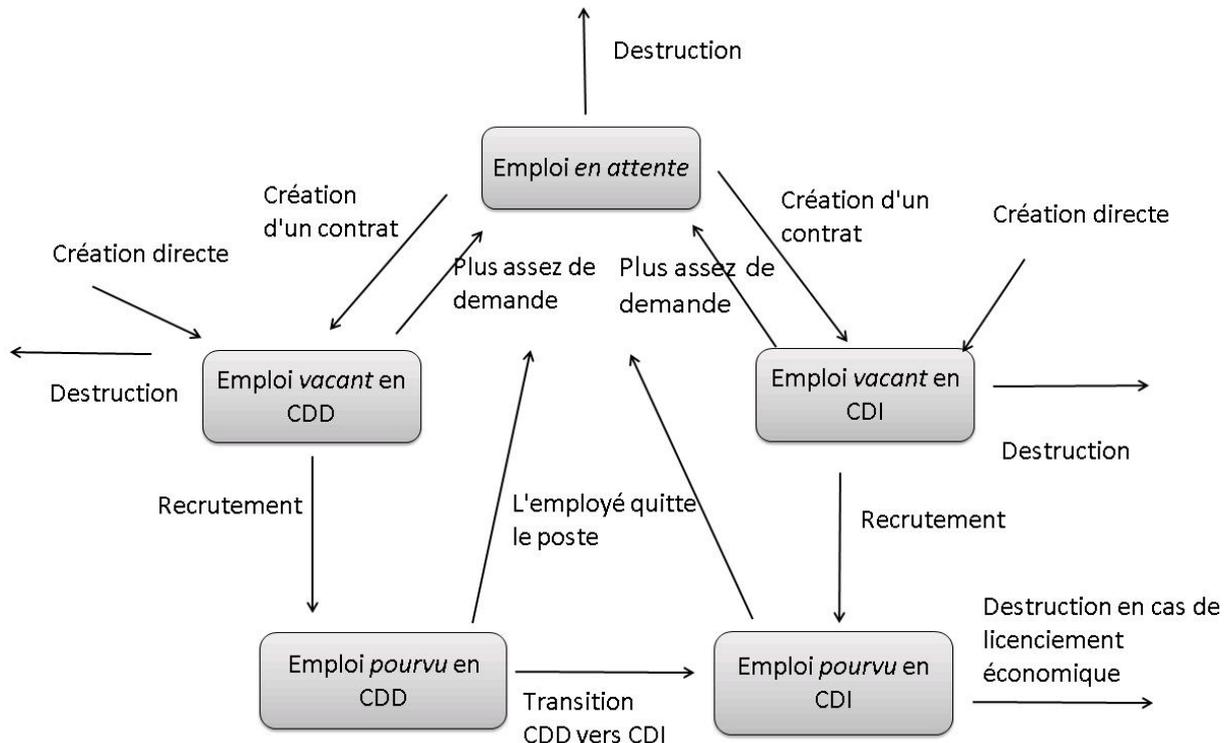


FIGURE 2.5 – Diagramme des transitions des emplois dans WorkSim

Les mécanismes qui conduisent au passage d'un poste d'un état à un autre seront décrits dans la section 2.6 qui présente les décisions des entreprises et des individus.

2.3.3.8 Histoire du poste

Pour chaque poste du modèle, est conservé un historique sur un an de la productivité du salarié. Cet historique permettra à l'entreprise d'effectuer un bilan annuel du salarié (cf. section 2.6.3.1 sur la gestion des salariés de l'entreprise).

2.3.3.9 Schéma récapitulatif d'un poste de salarié de l'entreprise

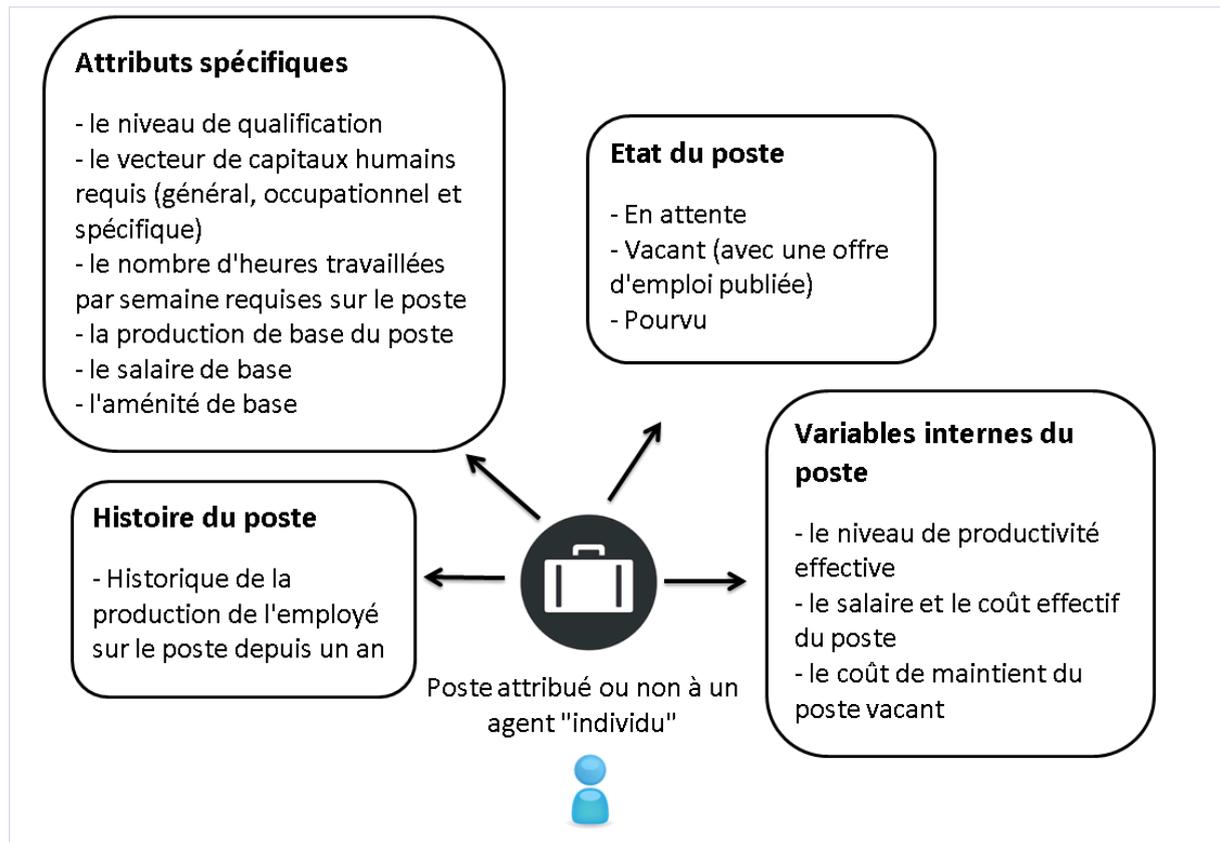


FIGURE 2.6 – Schéma d'un poste de salarié d'une entreprise privée

2.3.4 Modélisation du poste de dirigeant

Chaque entreprise privée du modèle a un dirigeant qui occupe un poste spécifique. Les micro-entreprises du modèle qui n'ont pas de salariés sont composées uniquement de ce poste de dirigeant. Elle peuvent bien sûr s'agrandir et embaucher des salariés par la suite.

Nous supposons que le dirigeant travaille à temps plein et produit dans les 3 niveaux de qualification suivant la répartition de la demande de l'entreprise par niveau de qualification. Cette modélisation permet de reproduire notamment la production des très petites entreprises pour lesquelles le dirigeant assure à lui seul un nombre important de tâches de l'entreprise. Nous supposons que le dirigeant ne quitte jamais son poste sauf en cas de départ à la retraite ou bien en cas de faillite de l'entreprise (mais dans ce cas l'entreprise disparaît aussi). Nous modélisons ainsi une part exogène d'individus dans l'état "dirigeant d'entreprise". Si un dirigeant du modèle part à la retraite, il est immédiatement remplacé par un individu du modèle, actif sur le marché du travail.

2.3.4.1 Production du dirigeant

Cette production est la moyenne de sa production dans les 3 niveaux de qualification.

$$Q_{0,j,t,total}^{eff} = \frac{1}{3} \sum_{q=1}^3 Q_{j,0,q}^{base} \times kProd_i \times cond_{i,t} \times F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \times F_{\lambda}(HC_{i,p,t}^{spec}) \quad (2.29)$$

avec $Q_{j,0,q}^{base} = QH_{j,q}^{base} \times HpW_0$. HpW_0 correspond à un travail à temps plein de 39.6h. Cette production est ensuite répartie par niveau de qualification q suivant :

$$Q_{0,j,q,t}^{eff} = \Psi_{j,q} \times Q_{0,j,t,total}^{eff} \quad (2.30)$$

avec $\Psi_{j,q}$, la part de la demande totale de l'entreprise j affectée au niveau de qualification q (cf. équation 2.8).

2.3.4.2 Salaire effectif du dirigeant

Le salaire du dirigeant est la moyenne des salaires dans les 3 niveaux de qualification :

$$S_{0,j,q,t}^{eff} = \frac{1}{3} \sum_{q=1}^3 \times Max(SMIC, S_{j,0,q}^{base} \times F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \times F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec})) \quad (2.31)$$

avec $S_{j,0,q}^{base} = SH_{j,q}^{base} \times HpW_0$.

2.4 L'environnement

L'environnement du modèle dans lequel évolue les agents "individu" et "entreprise privée" est composé d'un module institutionnel et de trois *artifacts* qui fournissant des services essentiels aux agents.

2.4.1 Le module institutionnel

Le module institutionnel comprend les principaux éléments du droit du travail avec les différents contrats ainsi que les effets des décisions gouvernementales par exemple sur le niveau du salaire minimum et sur le niveau des allocations.

2.4.1.1 La modélisation des contrats de travail

Dans WorkSim, les entreprises du modèle peuvent choisir de créer deux types de contrat de travail, les contrats à durée indéterminée (CDI) et les contrats à durée déterminée (CDD). Dans cette version de WorkSim, nous ne modélisons pas les missions d'interim pour lesquelles le fonctionnement est différent car les contrats d'interim ne sont pas signés directement entre l'entreprise et l'individu mais par l'intermédiaire d'une entreprise de travail temporaire. La part de l'interim dans l'emploi total en France en 2011 reste cependant faible (2.1% d'après (INSEE, 2011)).

Le contrat à durée déterminée (CDD) Les principales caractéristiques du CDD en France en 2011 que nous prenons en compte dans WorkSim sont les suivantes :

- un terme précis d'au maximum 18 mois. Certains cas plus rares de recours permettent de dépasser cette durée de 18 mois mais nous ne les prenons pas en compte dans le modèle.
- un renouvellement possible. Le contrat CDD est renouvelable une fois dans la limite de ces 18 mois.
- une période d'essai. La durée de la période d'essai d'un CDD varie selon la durée du contrat de travail. Si le salarié est engagé pour un CDD de 6 mois maximum, la période d'essai est d'un jour par semaine de travail. Pour les CDD de plus de 6 mois, la période d'essai est fixée à un mois.
- en cas de rupture du contrat avant son terme, l'employeur doit verser au salarié des dommages-intérêts d'un montant au moins égal aux rémunérations que le salarié aurait perçues jusqu'au terme du contrat.
- un délai de carence. Lorsqu'un contrat de travail à durée déterminée prend fin, il n'est pas possible d'embaucher, sur le même poste de travail, à nouveau en contrat à durée déterminée ou en contrat de travail temporaire, avant l'expiration d'une période égale : au tiers de la durée totale du contrat précédent, renouvellement inclus, si ce contrat est d'au moins 14 jours et à la moitié de la durée totale du contrat précédent, renouvellement inclus, si ce contrat est inférieur à 14 jours.
- la prime de précarité. Le salarié a droit à une indemnité de fin de contrat lorsque le CDD arrive à son terme. L'indemnité de fin de contrat est égale au minimum à 10% de la rémunération brute totale versée durant le contrat.

Le contrat à durée déterminée d'usage (CDD d'usage) Nous distinguons dans WorkSim le CDD d'usage du CDD standard qui est accessible seulement pour une part des entreprises privées du modèle (dans des secteurs d'activité précis comme le spectacle ou la restauration) d'après

(ACOSS, 2011). Nous supposons dans ce cas que ces entreprises créent uniquement ce type de contrat qui est très avantageux pour l'employeur. En effet, ce contrat permet d'embaucher de manière répétée des salariés en CDD avec reconduction du contrat sans limitation. Il n'y a ni date de fin précise dans le contrat, ni besoin de respecter de délai de carence, ni d'indemnité de fin de contrat à régler par l'employeur.

La part $SF \in [0, 1]$ des entreprises du modèle qui peuvent recourir à ces contrats est calibrée de façon à reproduire la part des CDD d'usage dans l'emploi total en 2011. Pour ces CDD d'usage, nous supposons qu'il n'y a pas de formation à l'embauche.

Le contrat à durée indéterminée (CDI) Les principales caractéristiques du CDI en France en 2011 que nous prenons en compte dans WorkSim sont les suivantes :

- pas de limite de temps ni de durée
- une période d'essai. Au terme de l'article L. 1221-19 du Code du travail, le contrat de travail à durée indéterminée peut comporter une période d'essai dont la durée maximale est : de deux mois pour les ouvriers et les employés, de trois mois pour les professions intermédiaires et de quatre mois pour les cadres.
- la rupture du contrat. Il existe 3 moyens de rupture d'un contrat à durée indéterminée (CDI) :
 - la démission : la rupture est à l'initiative du salarié ; aucune condition de forme n'est exigée,
 - la rupture conventionnelle ou licenciement à l'amiable : la rupture est décidée d'un commun accord entre l'employeur et le salarié
 - le licenciement personnel ou le licenciement économique : la rupture est à l'initiative de l'employeur ; le salarié bénéficie de compensations financières importantes.

Dans WorkSim, nous modélisons tous ces motifs de rupture sauf la rupture conventionnelle que nous assimilons à un licenciement personnel. Le détail des coûts et des conditions de licenciement sera présenté dans l'annexe D avec l'implémentation du contrat CDI.

- la période de préavis. En cas de licenciement, l'entreprise doit prendre en compte une durée de préavis pour le licenciement d'un CDI (article L1234-1 du code du travail). Ce préavis est d'un mois dans le cas où l'ancienneté du salarié est inférieure à deux ans et de deux mois sinon. Pendant cette durée, l'entreprise continue de verser un salaire et nous supposons que l'employé ne produit plus. Le poste est "bloqué" pendant cette période.

2.4.1.2 Le niveau des salaires, des charges et des allocations de référence

Le salaire minimum (SMIC) Le montant mensuel net du Salaire minimum interprofessionnel de croissance (SMIC) par semaine est de 1072.07 euros en 2011 pour un emploi à temps plein, d'après (INSEE, 2013c)

Le revenu de solidarité active (RSA) D'après (Service-Public.fr, 2011), "Le revenu de solidarité active (RSA) assure aux personnes sans ressources ou disposant de faibles ressources un niveau minimum de revenu variable selon la composition du foyer. Le RSA est ouvert, sous certaines conditions, aux personnes âgées d'au moins 25 ans et aux personnes âgées de 18 à 24 ans si elles sont parents isolés ou justifient d'une certaine durée d'activité professionnelle." Le calcul du montant du RSA ainsi que l'implémentation des conditions d'éligibilité seront précisés dans l'annexe A.

Les allocations chômage D'après (Public, 2011), les principales conditions exigées pour percevoir l'allocation de retour à l'emploi (ARE) ou indemnités chômage sont :

- Ne pas avoir quitté volontairement son emploi. Un salarié qui quitte volontairement son dernier emploi ne peut pas percevoir l'ARE.
- Rechercher de façon permanente un emploi salarié.

Le calcul du montant de l'allocation chômage est précisé dans l'annexe A

La pension de retraite Au moment de ce départ en préretraite, on calcule une pension du retraité qui entrera en compte dans les calculs d'utilité de son ménage. On fait l'hypothèse qu'elle est la même pour tous les agents et égale à 75% du salaire des 25 dernières années dans le privé (en tenant compte des régimes complémentaires) et 75% du salaire des 6 derniers mois dans le public.

Les cotisations sociales Les cotisations sociales sont des prélèvements associés au financement de prestations sociales. Une distinction est faite entre deux types de cotisations sociales :

- cotisations sociales salariales déduites du salaire brut
- cotisations sociales employeurs déduites du salaire chargé

Ainsi dans notre modèle, le coût effectif d'un salarié est :

$$C_{i,j,p,q,t}^{eff} = S_{i,j,p,q,t}^{eff} \times (1 + SalC) \times (1 + BenC) \quad (2.32)$$

avec *SalC* le pourcentage de charges sociales salariales par rapport au salaire net et *BenC* le pourcentage de charges sociales patronales par rapport au salaire brut.

Les allègements de charges sur les bas et moyens salaires Les salaires inférieurs à 1,6 fois le SMIC ouvrent droit à un allègement des cotisations patronales dues au titre des assurances sociales (maladie, maternité, invalidité, vieillesse, décès) et des allocations familiales. Le calcul de cet allègement de charges dépend de la taille de l'entreprise. Il sera précisé dans l'annexe A.

2.4.2 JobAds

En plus de ce module institutionnel, l'environnement comprend 3 *artifacts*. Le premier est l'artifact *JobAds*, qui répertorie d'un côté les offres d'emplois des entreprises et les demandes d'emplois.

Cet *artifact* est composé de la liste des emplois vacants par niveaux de qualification, de la liste des emplois pourvus par niveau de qualification et de la liste des chercheurs d'emploi. Les services proposés par *JobAds* aux agents sont les suivants :

- à la demande d'un agent "entreprise privée", *JobAds* fournit des informations sur les niveaux de productivité et de capitaux humains de *NPU* chercheurs d'emploi par niveau de qualification et suivant le type de contrat que ceux-ci ont recherché lors de la dernière période de la simulation. Ces informations seront utilisées par l'entreprise pour estimer le niveau de production et de profit qu'elle peut espérer si elle crée un nouvel emploi (cf. section 2.6.1).
- de façon symétrique, à la demande d'un agent "individu" lors de sa phase de prospection (cf. section 2.6.5.1), *JobAds* fournit des informations sur les niveaux des salaires de *NPJ* postes pourvus dans des entreprises privées par niveau de qualification. Ces informations seront utiles à l'individu pour savoir s'il a intérêt à commencer la recherche d'un nouvel emploi (cf. section 2.6.5).
- à la demande d'un agent chômeur ou employé *PARAE*, *JobAds* communique des offres d'emploi du niveau de qualification de l'individu et éventuellement d'un niveau supérieur (le nombre d'offres et le type de ces offres seront détaillés dans la section 2.6.5.7 qui présente le cycle de la simulation).

2.4.3 L'institut de statistiques

Le deuxième *artifact* est un *institut de statistiques* qui calcule l'ensemble des statistiques depuis un an dans la simulation, et diffuse un nombre limité d'informations aux agents, comme la liste exhaustive des tensions sur le marché du travail $TIGH_{q,t}$ ¹¹ et des taux de chômage $U_{q,t}$ par niveau de qualification. Cet *artifact* estime aussi pour l'ensemble des entreprises du modèle des données sur les durées des contrats, des postes vacants, des coûts et des probabilités de licenciement. Si un agent "entreprise privée" n'a pas assez d'informations en interne, il demande à l'*institut de statistique* ces données estimées pour l'ensemble des entreprises du modèle.

2.4.4 L'État

Le troisième *artifact* représente l'*État* qui recrute des fonctionnaires. Le modèle évolue dans un environnement stationnaire donc le nombre de fonctionnaires du modèle est maintenu constant. Dès qu'une place se libère quand un fonctionnaire part à la retraite, un individu dans l'état *étudiant* prend sa place.

Nous supposons que le salaire du fonctionnaire de niveau de qualification q est déterminé à l'embauche et évolue comme le salaire d'un salarié du secteur privé.

$$S_{i,p,q,t}^{eff} = \text{Max}(SMIC, S_{j,p,q}^{base} \times F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \times F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec})) \quad (2.33)$$

11. La tension sur le marché du travail du niveau de qualification q , $TIGH_{q,t}$, est définie comme le rapport entre le nombre de postes vacants du niveau de qualification q divisé par le nombre de chômeurs de ce même niveau de qualification

Ce salaire n'est cependant pas influencé par le facteur $G(U_{q,t})$ du taux de chômage sur le marché du travail

Les individus dans l'état *fonctionnaire* ne prennent pas de décision dans le modèle et restent en poste jusqu'à leur départ à la retraite. Les fonctionnaires ne sont donc pas en interaction avec les autres agents du modèle, mais influencent indirectement les décisions des autres agents "individu" car leurs revenus sont pris en compte dans le calcul des revenus du ménage.

2.5 Les modèles cognitifs et les décisions des agents "individu" et "entreprise privée"

Chaque agent du modèle a un objectif :

- pour l'agent "individu", il s'agit de trouver un état satisfaisant. Nous verrons que l'individu évalue un état avec une fonction d'utilité qui consiste en une agrégation de plusieurs critères.
- pour l'agent "entreprise privée", il s'agit de faire des profits

Pour satisfaire cet objectif, les agents disposent d'un nombre d'informations limitées sur leur environnement et ils peuvent prendre des décisions et interagir avec les autres agents du modèle. Nous présentons dans cette partie les modèles cognitifs des deux types d'agent "individu" et "entreprise privée".

2.5.1 Le modèle cognitif des agents "individu"

Seuls les individus dans les états *inactif*, *chômeur*, *employé PAE* et *employé PARAE* prennent des décisions dans le modèle¹². Ces mécanismes décisionnels se font à l'aide de fonctions d'utilité, qui permettent à l'individu de mesurer l'intérêt qu'il a de rester dans son état courant par rapport à l'éventualité d'un changement d'état. Ces utilités sont modélisées par une fonction de type Cobb-Douglas :

$$U = (In + Am + St)^{1-\alpha_{i,t}} (FT)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.34)$$

La fonction d'utilité consiste en une agrégation de quatre critères :

1. In : le revenu monétaire total du ménage par semaine dans lequel se trouve l'individu et divisé par le nombre d'unités de consommation du ménage et exprimé en euros. Son ordre de grandeur est d'environ 500 euros.
2. Am : caractéristiques non monétaires perçues par l'employé et correspondant au poste sur lequel il travaille. Ce niveau d'aménité est converti en euros de façon à pouvoir l'agréger avec un revenu monétaire. Ce niveau d'aménité peut être positif comme négatif. Il représente en moyenne de l'ordre de 10% du revenu en valeur absolue.

12. Les individus dans les états retraité, étudiant, dirigeant et fonctionnaire ne prennent pas de décisions. Ils entrent et sortent de ces états par des mécanismes exogènes de façon à reproduire en état stationnaire les proportions d'étudiant ; de retraité (cf. annexe E sur le module démographique) ; de fonctionnaire (cf. section 2.4.4) et de dirigeant (cf. section 2.3.4) dans la population totale

3. St : critère de stabilité reflétant la préférence de l'individu pour la stabilité, c'est à dire pour occuper un poste avec une durée restante de contrat la plus longue possible. La valeur maximale de ce critère correspondra à un poste avec un contrat à durée indéterminée. Il représente en moyenne de l'ordre de 10% du revenu en valeur absolue.
4. FT : le temps libre par semaine dont dispose l'individu en dehors de ses heures de travail, de recherche d'emploi et de temps physiologique¹³. Il est exprimé en heures. Il est de l'ordre d'une cinquantaine d'heures par semaine pour un individu en emploi à temps plein et de 91 heures pour un individu inactif. Dans ce calcul de temps libre, nous faisons l'hypothèse simplificatrice que les congés payés ne sont pas pris en compte.

Nous supposons qu'une conversion est possible entre le revenu, le facteur de stabilité et l'aménité, c'est-à-dire que l'individu est prêt à sacrifier un pourcentage de son salaire pour avoir de meilleures conditions de travail ou plus de stabilité.

Le paramètre $\alpha_{i,t}$ compris entre 0 et 1 représente la préférence de l'individu i pour le temps libre au temps t . C'est une variable interne de l'agent "individu" présentée dans la section 2.3.1.2 qui évolue avec l'âge de l'individu et dépend de son genre.

La fonction de Cobb-Douglas est simple et couramment utilisée en économie pour modéliser un arbitrage travail-temps libre. Elle présente en effet plusieurs propriétés intéressantes :

- elle est croissante en chacun de ses arguments, ce qui est pertinent, car une augmentation de l'un des deux facteurs tandis que l'autre reste constant, augmente l'utilité de l'individu.
- La fonction est concave en chacun de ses arguments, donc le gain marginal de chacun des facteurs diminue lorsqu'il s'accroît. Par exemple pour un individu avec 1000 euros de revenus par période, le gain de 100 euros en plus par période apporte plus en terme d'utilité que si l'individu gagne déjà 2000 euros par période.
- Enfin cette fonction est homogène de degré 1, donc les rendements d'échelles sont constants. Par exemple une multiplication par deux de chacun des facteurs multiplie aussi par deux l'utilité.

2.5.1.1 Détail des critères de la fonction d'utilité

Le revenu du ménage Le revenu du ménage In est la moyenne des sommes perçues chaque semaine par l'ensemble des individus qui composent le ménage (cf. section 2.3.1.3) divisé par la somme des unités de consommation du ménage (0.5 pour un enfant et 1 pour un adulte). On prend donc en compte la somme des revenus des deux parents auxquels s'ajoutent les revenus des enfants s'ils travaillent.

Le revenu de chaque individu du ménage dépend de son état :

- Si l'individu est employé, il s'agit de son salaire hebdomadaire $S_{i,j,t}^{eff}$
- Si l'individu est chômeur et éligible à l'assurance chômage, il perçoit des allocations chômage.

13. temps pour dormir, manger, se laver et se préparer

- S’il est inactif ou bien chômeur mais non éligible à l’allocation chômage, il peut percevoir le RSA (s’il est éligible)
- si l’individu est à la retraite, il touche une pension de retraite qui est calculée au moment de son départ à la retraite

Le calcul des allocations chômages et du RSA, ainsi que des conditions d’éligibilité à ces allocations sont présentés dans l’annexe A.

A chaque fois qu’un individu évaluera un nouvel état accessible pour prendre une décision dans le modèle, l’individu devra calculer le nouveau revenu global de son ménage à partir de son nouveau revenu individuel, nous notons ce revenu $In(S)$, avec S le nouveau revenu de l’individu.

De la même manière que pour les entreprises, nous ne modélisons pas le *capital* du ménage. Dans la fonction d’utilité est intégré un revenu par période (hors revenus et coûts exceptionnels). Nous faisons l’hypothèse simplificatrice que le versement d’un revenu ponctuel comme une indemnité de licenciement ou bien une prime de précarité n’est pas intégré dans le revenu du ménage.

L’aménité du poste L’aménité est un proxy pour l’ensemble des facteurs qui rendent le travail agréable ou pénible. Elle n’est révélée pleinement au salarié qu’après l’embauche, ce qui est source de certaines démissions précoces, conformément à ce qui se passe réellement¹⁴. Cette aménité peut être positive comme négative et correspond à l’aménité hebdomadaire du poste $A_{j,p,q}$ sur lequel l’individu travaille (cf. section 2.3.3.1). Cette variable est mise à 0 dans la fonction d’utilité pour les états d’inactif et de chômeur.

La stabilité du contrat Cette valeur traduit la préférence pour la stabilité du contrat et donc pour un contrat dont la durée restante est la plus longue possible.

Dans notre modèle, nous supposons que le calcul de cette variable pour l’individu i et relativement au contrat proposé pour le poste p s’écrit de la façon suivante :

- Si p est un poste avec un contrat CDD :

$$St_{p,c} = PrSt \times S_{j,p,q}^{base} \times \left(\frac{d_{CDD}}{d_{CDD}^{max}} \right) \quad (2.35)$$

avec $PrSt$ un paramètre exogène fixé, $S_{j,p,q}^{base}$ le salaire de base du poste, d_{CDD} le temps restant du contrat et d_{CDD}^{max} la durée maximale d’un contrat temporaire sur le marché du travail fixée à 18 mois pour la France en 2011.

- Si p est un poste avec un contrat CDI :

$$St_{p,c} = PrSt \times S_{j,p,q}^{base} \quad (2.36)$$

Cette formulation permet de garantir que la valeur du critère de stabilité est une fonction croissante de la durée restante du contrat.

Ce facteur est mis à 0 dans le calcul de la fonction d’utilité pour les états *inactif* et *chômeur*.

14. Cette imperfection de l’information est par ailleurs un phénomène symétrique par nature de l’imperfection de l’information de l’employeur sur la productivité du salarié qu’il embauche (cf. section 2.5.2.2). On suppose par contre que le salarié est rapidement informé de l’aménité, alors que la productivité n’est évaluée que très progressivement

Le temps libre par semaine Le temps libre par semaine est le temps dont dispose l'individu en dehors de ses heures de travail et de recherche d'emploi.

$$FT = Ta - Tw - Ts \quad (2.37)$$

avec Ta , le temps disponible par semaine, Tw le temps de travail par semaine et Ts le temps de recherche d'un emploi. Ces temps sont exprimés en heures.

- Le temps disponible Ta par semaine dans la semaine de travail est fixé à 91h. Il correspond à 7 jours par semaine multipliés par 13h de temps libre par jour (sans compter le temps physiologique d'environ 11h par jours (INSEE, 2011c)).
- Le temps de travail Tw est égal au nombre d'heures travaillées par semaine HpW_p sur le poste pour un état d'employé (cf. section 2.3.3.1). Le poste peut être à temps plein ou à temps partiel. Tw est bien sûr nul pour les états d'inactif et de chômeur.
- Le temps de recherche d'un emploi Ts est égal à $NSJ_U \times DSJ$ pour un chômeur avec NSJ_U le nombre d'offres d'emploi prospectées par un chômeur par semaine et DSJ le temps de prospection d'une offre d'emploi exprimé en heure. Pour un individu employé à la recherche d'un autre emploi le temps de recherche par semaine est $NSJ_O \times DSJ$ avec NSJ_O le nombre d'offres d'emploi prospectées par un employé PARAE par semaine. $Ts = 0$ pour les inactifs et les salariés qui ne sont pas à la recherche d'un autre emploi.

2.5.1.2 L'objectif de l'agent "individu"

L'objectif de l'individu est de trouver un état qui lui offre la meilleure utilité possible. La préférence pour un état ou un autre est spécifique à un individu puisque le calcul de sa fonction d'utilité fait intervenir sa préférence pour le temps libre $\alpha_{i,t}$. Elle dépend aussi de la situation des autres membres qui composent son ménage. Ainsi par exemple un individu peut préférer rester inactif dans le modèle ou choisir de travailler à temps partiel si sa préférence pour le temps libre est importante (femme avec de nombreux enfants à charge).

Nous supposons que les individus intègrent les revenus de leur ménage dans le calcul de leur fonction d'utilité mais prennent des décisions individuellement, sans stratégie de coopération avec les autres membres du ménage. La mise en place d'une stratégie de coopération mène à des modèles beaucoup plus compliqués dont l'apport ne paraît pas mériter une priorité. Le risque d'un modèle avec des décisions individuelles peut être celui de voir des décisions contraires se succéder en réponse aux décisions des autres membres du ménage, entraînant par exemple des allers-retours entre chômage et inactivité. Ce risque est diminué par l'introduction d'un coût psychologique du changement *ICHANG* (voir section 2.6.5.2).

L'objectif de l'individu est d'atteindre un état qui lui permet d'obtenir le plus d'utilité possible, en tenant compte des compétences dont il dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'il reçoit. Dans WorkSim, l'agent *individu* choisit de changer d'état, s'il trouve un nouvel état atteignable caractérisé par une utilité, qu'il évalue selon ses propres critères, supérieure à celle de son état courant. Dans ce cas, l'individu

arrête son processus de décision et change d'état.

C'est un processus de décision en rationalité limitée au sens de (Simon, 1955) et non "maximisateur d'utilité", car l'agent va choisir une décision lui offrant un espoir d'augmenter son utilité sans forcément chercher à obtenir une utilité maximale. Ce processus de décision à rationalité limitée a deux justifications :

1. D'une part, dans la réalité, les agents ne peuvent pas percevoir la globalité de l'environnement. Par exemple un chômeur n'aura pas accès à toutes les offres de postes vacants en même temps.
2. Ils choisissent de changer s'ils perçoivent une situation qui semble mieux, et se satisfont d'une situation qui n'est potentiellement pas la meilleure possible, mais qu'ils évaluent au dessus d'un seuil qu'ils trouvent acceptable.

A partir des données perçues et anticipées par l'individu sur sa situation et sur son environnement, l'individu prend un ensemble de décisions en rationalité limitée et de façon séquentielle. Ces décisions dépendent de l'état dans lequel se trouve l'individu et seront présentées dans la section 2.6.5 sur le cycle de la simulation.

2.5.2 Le modèle cognitif des agents "entreprise privée"

Nous présentons maintenant le modèle cognitif des agents "entreprise privée".

2.5.2.1 L'objectif de l'entreprise

Nous supposons que l'agent "entreprise" est rationnel au sens où il cherche obtenir le meilleur profit possible $\Phi_{j,t}^{eff}$ chaque période. D'après l'équation 2.19 :

$$\Phi_{j,t}^{eff} = R_{j,t}^{eff} - C_{j,t}^{eff} \quad (2.38)$$

Pour obtenir ce meilleur profit, l'entreprise peut donc augmenter son revenu ou bien réduire ses coûts. D'après l'équation 2.16, le revenu de l'entreprise est :

$$R_{j,t}^{eff} = P \times \sum_{q=1}^3 \min(Q_{j,q,t}^{eff}, D_{j,q,t}) \quad (2.39)$$

avec $Q_{j,q,t}^{eff}$ le niveau de production de l'entreprise par niveau de qualification qui correspond à la somme des productions de tous les salariés du niveau de qualification q et donné par l'équation 2.17 :

$$\forall q, Q_{j,q,t}^{eff} = \sum_{i=1}^{ne_{j,q,t}} Q_{i,j,q,t}^{eff} + Q_{0,j,q,t}^{eff} \quad (2.40)$$

Le revenu de l'entreprise dépend du prix P , de $Q_{j,q,t}^{eff}$ et de $D_{j,q,t}$ pour chaque niveau de qualification. Dans notre modèle, le prix P est supposé exogène et fixe. La demande évolue aussi de façon exogène et stochastique. L'entreprise n'a aucun contrôle sur cette évolution.

L'entreprise peut donc jouer uniquement sur son niveau de production et sur ses coûts. D'après la section 2.16, nous avons vu que la production en surplus par rapport à la demande par niveau de qualification est perdue, donc l'entreprise n'a pas *a priori* intérêt à produire plus que son niveau de demande. Elle adopte une stratégie pour ajuster sa production $Q_{j,q,t}^{eff}$ par niveau de qualification à son niveau de demande par qualification, et limiter ses coûts $C_{j,t}^{eff}$ de façon à obtenir le meilleur profit chaque période sur un horizon limité.

Le modèle cognitif de l'entreprise pour mettre en place cette stratégie est composé de quatre modules que nous présentons dans les sections suivantes : un module de *perception*, un module d'*estimation*, un module d'*anticipation* et un module de *décision*.

2.5.2.2 Le module de *perception* de l'entreprise

Marge de demande de l'entreprise Pour chaque niveau de qualification q , l'entreprise observe une marge de demande $DM_{j,q,t} = D_{j,q,t} - (Q_{j,q,t}^{eff} + Q_{j,q,t}^*)$. Cette marge est l'écart entre d'une part sa quantité de bien demandée et d'autre part la somme de la quantité totale de production effectivement produite $Q_{j,q,t}$ du niveau de qualification q à laquelle s'ajoute la production totale espérée des postes vacants de l'entreprise $Q_{j,q,t}^*$ de ce même niveau de qualification et en attente d'être pourvus.

Cette marge de demande est un indicateur qui permet à l'entreprise de savoir si son niveau de production est en dessous ou bien au-dessus de son niveau de demande par niveau de qualification.

Pour chaque niveau de qualification q , si $DM_{j,q,t} > DT$, avec $DT \in [0, 1000]$ un paramètre exogène calibré de seuil de demande, l'entreprise observe une marge de demande positive et suffisante pour envisager de créer un poste et augmenter son niveau de production $Q_{j,q,t}$ de façon à augmenter ses revenus.

Si $DM_{j,q,t} < -DT$, l'entreprise observe que son niveau de production est inférieur à son niveau de demande. Comme l'entreprise ne peut pas vendre plus de production que son niveau de demande, elle peut souhaiter détruire des emplois pour ajuster sa production à son niveau de demande et ainsi réduire ses coûts.

Dans le cas où $-DT < DM_{j,q,t} < DT$, nous supposons que l'entreprise n'observe pas d'impact significatif justifiant de mettre un œuvre un processus de création ou de destruction de postes. Nous supposons que cette zone d'inertie est liée à l'existence de coûts de transaction nécessaires pour créer ou détruire un poste (Williamson, 1981) (coûts par exemple liés à la recherche d'information ou à la mise en place du processus d'évaluation du profit).

Détermination de la production estimée d'un individu sur un poste par l'entreprise L'entreprise connaît son niveau de production total $Q_{j,q,t}^{eff}$ par niveau de qualification q qui lui permet de calculer sa marge (voir ci-dessus), mais nous supposons qu'elle n'a pas *a priori* la connaissance précise des niveaux de productivité effective associés à chacun de ses salariés (d'après la théorie de l'appariement de Jovanovic (Jovanovic, 1979)).

Pour un salarié, elle sait seulement évaluer un niveau de productivité estimé :

$$Q_{i,j,p,q,t}^{est} = Q_{i,j,p,q,t}^{eff} \times \sigma_{i,p,q,t}^{Eval} \quad (2.41)$$

$\sigma_{i,p,q,t}^{Eval}$ représente le niveau d'incertitude de l'entreprise pour évaluer un salarié. Il dépend de l'ancienneté du salarié sur son poste et il est retiré aléatoirement à chaque période selon :

$$\sigma_{i,p,q,t}^{Eval} = \text{Max}(0, \mathcal{N}(1, \sigma_0 \times \text{Max}(0, 1 - \delta_\sigma \times \text{Sen}_{i,p,t}))) \quad (2.42)$$

Avec $\sigma_0 \in [0, 0.5]$, $\delta_\sigma \in [0, 0.01]$ des paramètres exogènes calibrés et $\text{Sen}_{i,p,t}$ l'ancienneté de l'individu sur le poste.

Avec cette équation, l'incertitude sur la productivité effective est maximale pour un individu qui n'a pas d'ancienneté sur le poste. Cette incertitude décroît ensuite avec le temps passé sur le poste¹⁵ (cf. Figure 2.7).

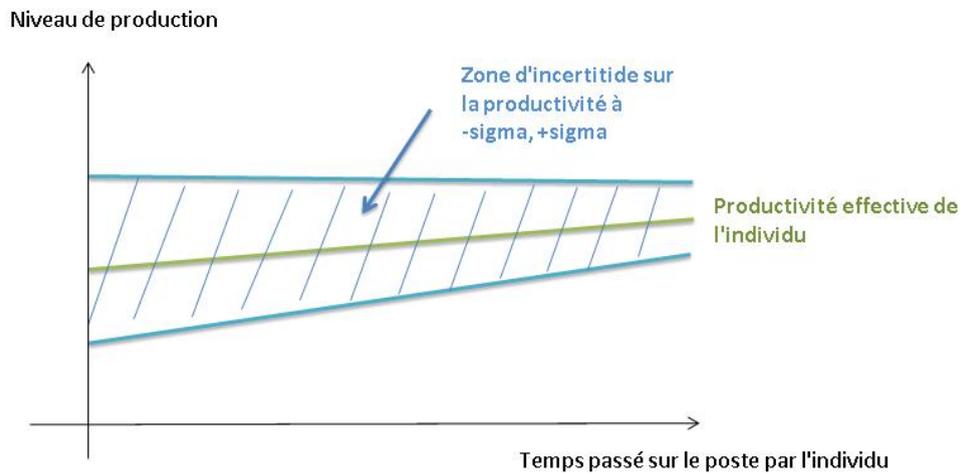


FIGURE 2.7 – Schéma de l'estimation de la productivité par l'entreprise

2.5.2.3 Le module d'estimation de l'entreprise

L'entreprise évolue dans un environnement incertain pour trois raisons :

1. l'évolution de son niveau de demande est stochastique et les facteurs qui gouvernent cette évolution (cf. section 2.3.2.2) sont supposés inconnus par l'entreprise.
2. l'entreprise est en interaction avec les autres agents et sa situation peut dépendre des décisions prises par les autres agents du modèle. Par exemple, l'entreprise est en

15. Dans le cas particulier où l'entreprise ne possède qu'un seul salarié du niveau de qualification q , comme elle connaît son niveau de production totale par niveau de qualification, elle peut en déduire sans incertitude la productivité de ce salarié. Dans ce cas $\sigma_{i,p,q,t}^{Eval} = 1$ et $Q_{i,j,p,q,t}^{est} = Q_{i,j,q,t}^{eff}$.

Quand l'entreprise évalue un candidat potentiel pour un de ses poste qui n'est pas dans l'entreprise, l'ancienneté de l'individu sur le poste est nulle et donc le niveau d'incertitude est maximal et égal à σ_0

compétition avec les autres agents "entreprise" sur le marché du travail pour recruter les meilleurs candidats. La situation de l'entreprise est aussi influencée par les décisions des agents individus qui peuvent choisir de démissionner, de ne pas postuler à ces offres d'emploi si le salaire n'est pas attractif par exemple...

3. Enfin, la législation du marché du travail peut changer si nous introduisons une variante de politique publique.

L'entreprise doit donc s'adapter à chaque instant. Pour modéliser cette adaptation nous introduisons des processus d'estimation de l'agent entreprise. Nous supposons que l'entreprise met à jour ses connaissances à partir des situations qu'elle rencontre. Dans certain cas, l'agent *n'a pas rencontré assez d'événements* pour réaliser cette estimation. Dans ce cas, il demande des informations à l'institut de statistique du modèle qui collecte des informations pour toutes les entreprises du modèle. Il s'agit d'une forme d'estimation collective de l'ensemble des entreprises du modèle.

Durée moyenne apprise des contrats indéterminés Un contrat CDI n'a pas de durée prédéfinie, sa durée maximale théorique est l'âge de départ à la retraite du salarié. Cependant, en pratique, le salarié peut quitter le poste de lui même, l'entreprise peut constater une insuffisance professionnelle du salarié et mettre fin à sa période d'essai, etc... Donc l'entreprise doit estimer une durée potentielle moyenne d'un contrat CDI.

Cette durée espérée moyenne d_{CDI} est apprise en interne par l'entreprise. C'est la durée moyenne des CDI qui se sont terminés pendant les trois dernières années dans l'entreprise. Nous supposons que si l'entreprise n'a pas connu plus de trois fins de contrat permanent, cette durée est demandée à l'institut de statistiques qui l'apprend pour l'ensemble des entreprises (cf section 2.4.3).

Durée moyenne estimée des postes vacants La durée de vacance des postes est difficilement calculable de façon *ex ante* car elle dépend de la tension sur le marché du travail et des décisions des chercheurs d'emploi qui peuvent trouver l'offre attractive ou non et décider alors de candidater.

A partir de son historique des postes vacants qui se sont terminés pendant les dernières années, l'entreprise estime en interne la durée moyenne des postes vacants par type de contrat et par durée de contrat.

Si l'entreprise n'a pas connu plus de trois fins de poste vacant pour une durée et un type de contrat donné, la durée est demandée à l'institut de statistiques qui estime cette durée pour l'ensemble des entreprises (cf section 2.4.3).

Estimation collective de la probabilité et des coûts de licenciement personnel Lorsque l'entreprise embauche un nouveau salarié, elle doit prendre en compte que l'individu peut se révéler à l'avenir peu productif et qu'elle devra le licencier. Ce cas de licenciement pour motif personnel dépend des caractéristiques propres du salarié et ne peut pas être évalué avec précision car l'entreprise ne connaît pas le véritable noyau de productivité de l'individu. Nous supposons donc que le coût moyen lié à un éventuel licenciement personnel est appris par l'ensemble des entreprises.

L'institut de statistiques comptabilise les contrats qui se sont terminés depuis un an et calcule pour chaque niveau de qualification, la probabilité qu'un contrat se termine par un licenciement personnel $PrPF_q$ et le coût moyen associé dans ce cas : PFC_q^{avg} . Il communique ces deux données aux entreprises du modèle.

2.5.2.4 Le module d'anticipation de l'entreprise

Nous avons vu que l'entreprise connaît sa marge de demande $DM_{j,q,t}$ à au temps t par niveau de qualification q (cf. section 2.5.2.2). Cependant, pour créer des postes et des contrats qui impliquent un engagement dans le temps avec un salarié, l'entreprise doit aussi évaluer comment cette marge de demande peut évoluer.

L'idée centrale qui gouverne le processus d'évaluation de la firme repose sur la façon dont l'entreprise anticipe sa demande future. Si l'entreprise prévoit que sa demande peut augmenter, la création d'un nouveau contrat peut être profitable à l'avenir. Par contre si la demande est susceptible de baisser, cet emploi risque de ne plus être profitable.

La firme va calculer trois scénarios d'évolution de cette demande comme décrit sur la figure 2.8 :

- le "mauvais" scénario d'évolution de la demande correspond à $\theta = -1$
- le scénario "neutre" à $\theta = 0$
- le "bon" scénario à $\theta = +1$

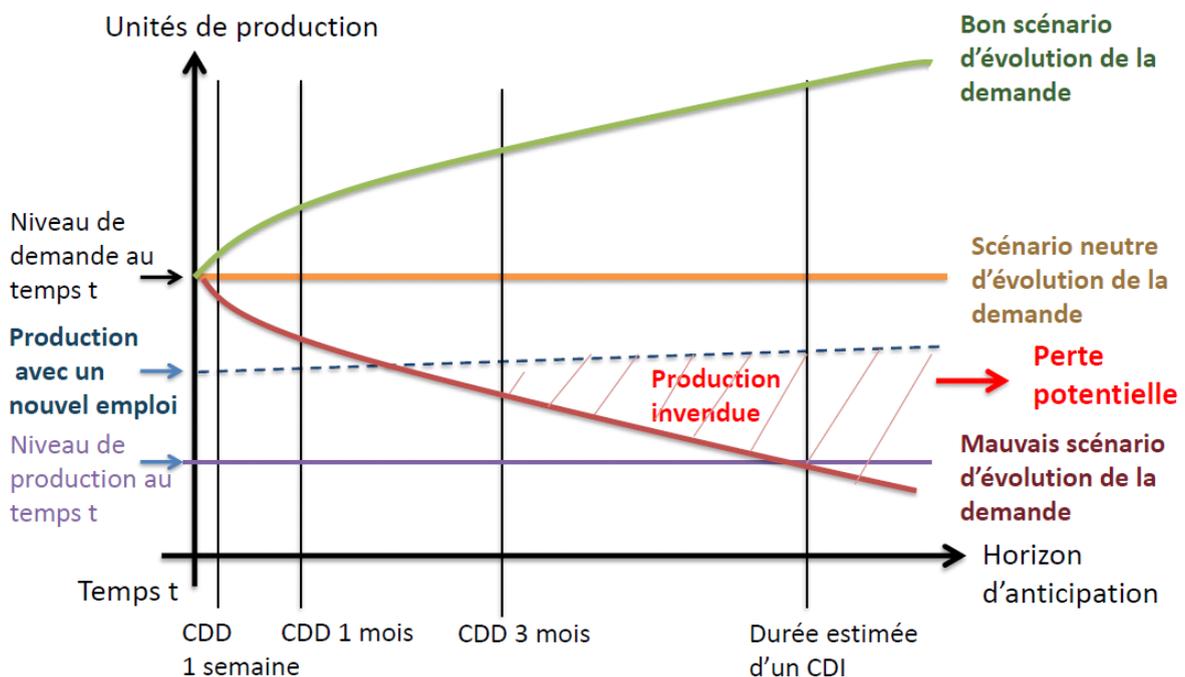


FIGURE 2.8 – Demande et anticipation du risque

Le niveau de production avec un nouvel emploi (tirets en pointillé) augmente légèrement grâce à l'évolution des capitaux humains de l'individu sur le poste.

Nous voyons sur cette figure que dans le cas d'un mauvais scénario d'évolution de la demande ($\theta = -1$) et après un certain temps, la demande de l'entreprise est en dessous de son niveau de production avec le nouvel emploi. Comme l'entreprise ne peut pas vendre plus de production que sa demande, ceci peut résulter en une perte car l'entreprise doit continuer à payer un salaire.

Dans cet exemple, nous voyons qu'il peut être plus profitable pour l'entreprise de choisir un contrat avec une durée attendue plus courte comme un contrat CDD de 3 mois. En effet, l'entreprise aura la possibilité de mettre fin au contrat après cette échéance en cas de mauvais scénario de la demande ou bien pourra éventuellement renouveler le contrat si son niveau de demande évolue positivement.

Cependant plus le contrat est court, plus il devient difficile pour la firme d'amortir les coûts de recrutement et de formation de l'employé. Il y a donc un arbitrage qui dépend du niveau d'incertitude sur la demande future et de comment la firme perçoit ce risque.

Le processus de calcul de la marge de demande anticipée de la firme se fait en 3 étapes que nous présentons dans les paragraphes suivants :

1. Une estimation des facteurs de tendance et d'aléa de la demande à partir de l'historique de l'entreprise
2. Une anticipation de la demande dans 3 scénarios possibles
3. Un calcul du *buffer* de l'entreprise, la marge de demande supplémentaire potentiellement disponible à l'avenir

Estimation de la tendance et de l'aléa de la demande Nous supposons que l'entreprise peut observer son niveau de demande courant $D_{j,t}$, mais en revanche n'a pas accès aux paramètres $\mu_{MS,j,t}$, $\sigma_{MS,j,t}$ qui gouvernent l'évolution de cette demande (cf. equation 2.11).

A partir de l'historique de sa demande globale observée au cours de la dernière année (52 périodes), l'entreprise estime des facteurs de tendance et d'aléa de l'évolution de sa demande $\widehat{\mu}_j$, $\widehat{\sigma}_j$. Les deux facteurs sont déterminés à partir d'une régression linéaire sur son historique de demande. Le détail de ce calcul est présenté dans l'annexe B.

Anticipation de la demande Connaissant les facteurs d'évolution de sa demande $\widehat{\mu}_j$, $\widehat{\sigma}_j$, l'entreprise anticipe que sa demande augmente d'un choc $\delta \sim \mathcal{N}(\widehat{\mu}_j, \widehat{\sigma}_j)$ chaque période. Elle en déduit une augmentation de sa demande à l'horizon d qui est la somme de ces d petits chocs indépendants :

$$\Delta \sim \mathcal{N}\left(d \times \widehat{\mu}_j, \sqrt{d} \times \widehat{\sigma}_j\right) \quad (2.43)$$

Cet impact à l'horizon d a 99% de chance d'être compris dans l'intervalle $[d \times \widehat{\mu}_j - 3 \times \sqrt{d} \times \widehat{\sigma}_j, d \times \widehat{\mu}_j + 3 \times \sqrt{d} \times \widehat{\sigma}_j]$.

Nous faisons l'hypothèse que les 3 scénarios d'évolution de la demande évalués par l'entreprise correspondent à la borne basse, au centre et à la borne haute de cet intervalle :

$$I^{total}(\theta, d) = d \times \widehat{\mu}_j + 3 \times \theta \times \sqrt{d} \times \widehat{\sigma}_j \quad (2.44)$$

Avec :

- $\theta = +1$ dans le cas du scénario positif
- $\theta = 0$ dans le scénario neutre
- $\theta = -1$ dans le scénario négatif

L'entreprise en déduit un impact potentiel $I(d)$ sur son niveau de demande après d périodes par niveau de qualification q et dans chacun des 3 scénarios :

$$I_q^{total}(\theta, d) = \Psi_{q,j} \times \left(d \times \widehat{\mu}_j + 3 \times \theta \times \sqrt{d} \times \widehat{\sigma}_j \right) \quad (2.45)$$

Avec $\Psi_{q,j}$, la part de la demande globale allouée au niveau de qualification q (cf. équation 2.8).

Influence du "buffer" de l'entreprise : Lorsque l'entreprise évalue la création d'un nouveau poste avec un nouveau contrat, nous faisons l'hypothèse qu'elle tient compte des échéances de ses autres contrats.

Nous modélisons ainsi un facteur de *buffer* (ou "tampons") dans le mécanisme d'anticipation de la firme qui représente la marge de demande que l'entreprise est capable de "libérer" à l'avenir en mettant fin à ses contrats courts. Cette prise en compte du *buffer* permet par exemple à l'entreprise de créer un contrat long en CDI même si son niveau d'incertitude sur sa demande est élevé, car elle sait que si son niveau de demande baisse à l'avenir, elle pourra mettre fin à ses contrats courts.

Avec cette modélisation, les contrats à courts peuvent ainsi être vus comme des "amortisseurs" ou "tampon" pour les autres contrats plus longs si l'entreprise rencontre une situation de crise.

Au temps t , l'entreprise calcule un *buffer* noté $B_{j,q,t}(d)$ par niveau de qualification q et à chaque horizon d (donc au temps $t + d$). Ce *buffer* est la somme des productions estimées des postes de l'entreprise dont les contrats ont des échéances plus courtes que d à partir de la période t présente : CDD courts et départs prochains de salariés en CDI à la retraite.

Cette modélisation du *buffer* de l'entreprise est représentée sur le schéma 2.9 ci-dessous.

Marge de demande potentielle à l'horizon d A partir du calcul d'impact sur sa demande et du calcul de son *buffer*, l'entreprise en déduit une marge de demande anticipée et potentiellement disponible après d périodes à partir de la période t courante :

$$AD_{j,q,t}(\theta, d) = D_{j,q,t} + I_{q,t}^{total}(\theta, d) - (Q_{j,q,t}^{eff} + Q_{j,q,t}^* - B_{j,q,t}(d)) \quad (2.46)$$

ou encore :

$$AD_{j,q,t}(\theta, d) = DM_{j,q,t} + I_{q,t}^{total}(\theta, d) + B_{j,q,t}(d) \quad (2.47)$$

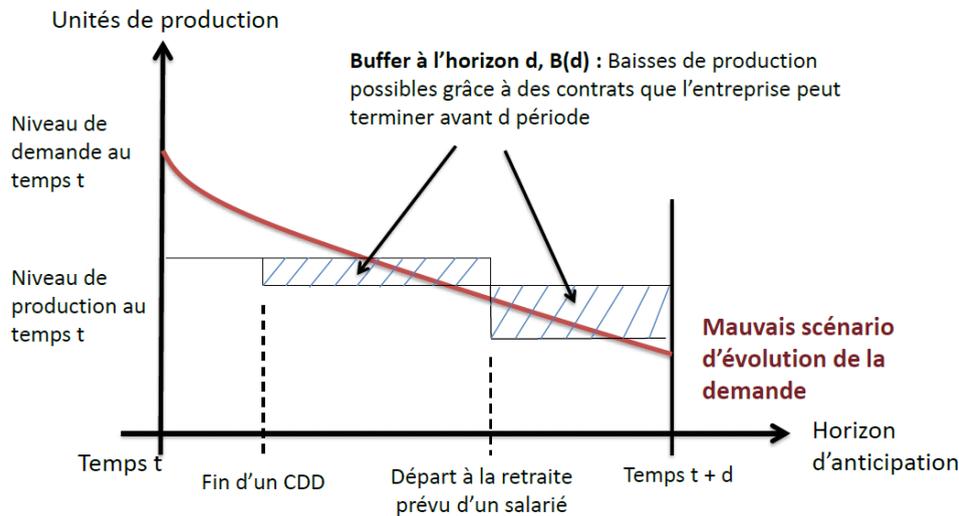


FIGURE 2.9 – Buffer à l'horizon d

2.6 Le cycle de la simulation et les décisions des agents

Après avoir présenté les modèles cognitifs des agents "individu" et "entreprise privée", nous présentons maintenant le cycle des décisions des agents.

Une période dans WorkSim se décompose en quatre phases : A) Décisions économiques des entreprises ; B) Décisions des individus ; C) Recrutements et Promotions et D) Processus démographiques. La Figure 2.10 résume le déroulement de cette période.

La longueur d'une période dans le modèle représente une semaine dans le monde réel, afin de prendre en compte les CDD qui ont une durée d'une semaine, et qui représentent environ 50% des flux d'embauche en France en 2011 (ACOSS, 2011).

A chaque période de la simulation, les agents effectuent chacun un ensemble d'actions. Les actions de ces agents se font de manière séquentielle. Dans la phase A, par exemple, la première firme effectue ses actions, ensuite la deuxième, etc... Dans la phase B, le premier individu effectue ses actions, puis le deuxième, etc...

De façon à éviter un biais lié à l'ordre dans lequel les agents prennent leurs décisions, nous faisons jouer les agents individu et les agents entreprises privées dans un ordre retiré aléatoirement à chaque période de la simulation.

2.6.1 Phase A - Étape 1 : Création de nouveaux postes et de nouveaux contrats

Pour chaque niveau de qualification q , si $DM_{j,q,t} > DT$, l'entreprise envisage d'augmenter son niveau de production $Q_{j,q,t}^{eff}$.

Nous supposons que pour des raisons d'organisation interne de l'entreprise, celle-ci doit

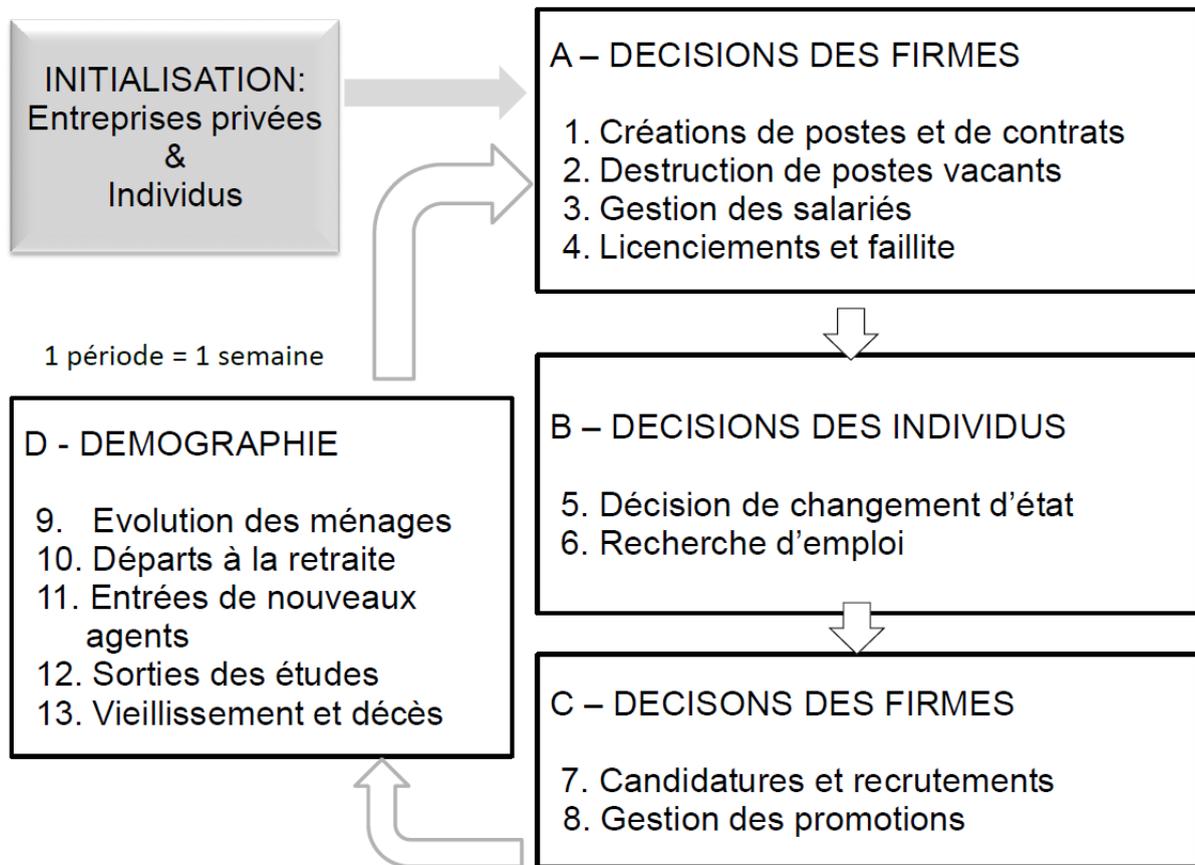


FIGURE 2.10 – Cycle de la simulation de WorkSim

commencer par recréer des offres d'emplois pour ses postes dans l'état *en attente* avant de pouvoir créer de nouveaux postes.

Dans le cas de la création d'un nouveau poste, ses caractéristiques sont déterminées aléatoirement comme précisé dans la section 2.3.3.1 :

- le nombre d'heures par semaine travaillées sur le poste $H_p W_p$
- le vecteur des capitaux humains requis sur le poste $(HC_{Req}^{spec}, HC_{Req}^{gen}, HC_{Req,q}^{occ})$
- le niveau de production de base du poste $QH_{j,q}^{base}$
- le niveau de salaire de base du poste $SH_{j,q}^{base}$

2.6.1.1 Choix d'un contrat à affecter au poste

L'entreprise doit décider si elle crée le poste avec un contrat CDD ou un contrat CDI. Les CDD sont évalués à chaque fois pour différentes durées initiales de mission : 1 semaine, 1 mois, 2 mois, 3 mois, 6 mois, 12 mois et 18 mois.

Prise en compte du délai de carence Lorsque l'entreprise envisage de créer un contrat pour un poste dans l'état *en attente* sur lequel était précédemment employé un salarié en CDD,

l'employeur doit respecter un *délai de carence*. Dans ce cas, l'entreprise évalue la création d'une offre d'emploi en CDI immédiatement ou bien la création d'un contrat en CDD après cette durée de carence sur ce poste p notée $WP_{p,t}$.

Durée et option possibles de fin de contrat Nous notons d_c la durée de chaque contrat et c le contrat évalué. L'entreprise peut avoir la possibilité d'arrêter ce contrat avant son terme. Cet ensemble des options possibles de fin de contrat est noté D_c^{option} . Par exemple avec un contrat CDD de durée initiale d_{CDD} , mais renouvelable une fois avec la même durée, l'ensemble des durées possibles est $D_c^{option} = \{d_{CDD}, 2 \times d_{CDD}\}$, et durant le processus de calcul du profit avec un scénario donné d'évolution de la demande la firme choisira la meilleure option de durée (cf. équation 22 de l'annexe C).

Évaluation de candidats potentiels sur le poste D'après la section 2.4.2, l'entreprise dispose d'informations sur un ensemble de NPU candidats potentiels, noté $E_{q,c}$, du niveau de qualification q pour chaque type de contrat c . Conformément à la théorie de la recherche, cet ensemble de candidats lui permet d'évaluer le profit qu'elle peut obtenir avec le nouveau poste et donc d'évaluer l'intérêt de commencer une recherche d'un nouvel employé (qui a un coût car l'entreprise doit payer un coût de vacance du poste chaque période)¹⁶.

Pour chaque contrat c , et pour chaque candidat i , l'entreprise calcule un profit $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ par période anticipée (mais calculé au temps t) d'un individu i sur un poste p avec un nouveau contrat c .

Pour évaluer ce profit $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ avec un contrat c et un candidat potentiel i , l'entreprise prend en compte jusqu'à cinq phases :

1. Une phase éventuelle de recrutement pendant laquelle le poste restera vacant pendant une durée d_v , ce qui génère un coût total de vacance VC
2. Une phase éventuelle de formation, de façon à transmettre au nouvel embauché des niveaux de capitaux humains au moins égaux à ceux requis par le poste. Cette formation a un coût noté TC .
3. La phase du contrat proprement dite qui comprend éventuellement un renouvellement et qui dure de la période d_v à la période $d_v + d_c$.
4. Une phase éventuelle de préavis de durée d_n dans le cas d'un licenciement. Pendant cette période, nous supposons que l'employé ne produit pas, mais que l'entreprise continue de verser un salaire à l'employé, ce qui génère un coût supplémentaire c_n .
5. Une phase éventuelle de carence du poste de durée d_w dans le cas d'un CDD. Lors de cette phase le poste est "bloqué" et l'entreprise ne perçoit aucun profit.

Le calcul de ce profit pour chacune de ces phases est détaillé dans l'annexe C. Il est réalisé pour chaque scénario d'évolution de la demande ($\theta \in -1, 0, 1$) anticipé par l'entreprise et

16. De façon symétrique, nous verrons que de l'autre côté du marché du travail, les agents "individu" évaluent l'intérêt de commencer une recherche d'emploi en calculant le niveau d'utilité qu'ils peuvent obtenir pour un nombre limité de postes de leur niveau de qualification

en prenant en compte son *buffer* (cf. section 2.5.2.4). L'entreprise calcule ensuite un profit moyen pondéré sur ces trois scénarios avec les coefficients de pondération ω_{-1} , ω_0 et ω_{+1} . Ces poids ont une grande importance dans le modèle cognitif de l'entreprise, car ils représentent l'importance que l'entreprise donne à chaque type de scénarios possibles d'évolution de la demande dans son processus d'évaluation : scénario pessimiste, neutre ou bien optimiste. Ils représentent donc la façon dont l'entreprise prend en compte le risque dans le modèle.

Une fois les profits $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ calculés pour chacun des candidats i , l'entreprise en déduit un profit moyen anticipé par période :

$$\phi_{j,p,q,c,t}^{avg} = \frac{\sum_{i \in E_{q,c}} \phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}}{NPU} \quad (2.48)$$

L'entreprise choisit de créer le contrat c avec le meilleur profit $\phi_{j,p,q,c,t}^{avg}$ qui est supérieur à 0. Si aucun profit n'est supérieur à 0, l'entreprise ne crée pas de nouveau contrat.

L'entreprise calcule aussi la productivité moyenne attendue des candidats au moment de l'embauche sur le poste :

$$Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg} = \frac{\sum_{i \in E_{q,c}} Q_{i,j,p,q,t}^{est}}{NPU} \quad (2.49)$$

Cette production moyenne attendue du poste au moment de l'embauche est déduite de la marge de demande de l'entreprise : $DM_{j,q,t} \leftarrow DM_{j,q,t} - Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$.

L'entreprise crée d'autres nouveaux contrats et/ou postes tant que $DM_{j,q,t} > DT$

Algorithme de choix du contrat Cet algorithme de décision de création d'un nouveau contrat est résumé ci-dessous :

Algorithm 1 Choix d'un contrat à affecter au poste

```

1: tant que  $DM_{j,q,t} > DT$  et  $BesContract \neq \emptyset$  faire
2:    $BestProfit = -\infty$ 
3:    $BesContract = \emptyset$ 
4:   pour chaque contrat  $c$  de durée  $d_c$  faire
5:     pour chaque candidat  $i \in E_{q,c}$  faire
6:       calculer  $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ 
7:     fin pour
8:     calculer  $\phi_{j,p,q,c,t}^{avg} = \frac{\sum_{i \in E_{q,c}} \phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}}{NPU}$ 
9:     si  $\phi_{j,p,q,c,t}^{avg} > 0$  et  $\phi_{j,p,q,c,t}^{avg} > BestProfit$  alors
10:       $BestProfit = \phi_{j,p,q,c,t}^{avg}$ 
11:       $BesContract = c$ 
12:     fin si
13:   fin pour
14:   si  $BestProfit > 0$  alors
15:     Publication d'un offre d'emploi pour le poste  $p$  avec le contrat  $c$ 
16:     calcul de  $Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$ 
17:      $DM_{j,q,t} \leftarrow DM_{j,q,t} - Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$ 
18:   fin si
19: fin tant que

```

Calcul de la norme d'embauche. Si l'entreprise choisit de publier une nouvelle offre d'emploi, elle calcule une norme d'embauche en terme de profit minimum attendu pour le poste avec un nouvel employé.

Parmi les profits $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ calculés pour chacun des candidats potentiels et qui sont positifs, l'entreprise retient la moyenne ϕ_{Moy}^{per} , le maximum ϕ_{Max}^{per} , et le minimum ϕ_{Min}^{per} .

Elle calcule ensuite la norme d'embauche de la façon suivante :

$$HNorm_{j,p,q,t=crea} = (\phi_{Moy}^{per} + N_1 \times (\phi_{Max}^{per} - \phi_{Min}^{per})) \frac{N(d_c)}{H(TIGH_{q,t=crea})} \quad (2.50)$$

Avec

- $N_1 \in [0, 1]$ un paramètre exogène calibré. C'est la sensibilité à l'écart entre le meilleur profit ϕ_{Max}^{per} et le plus faible profit des candidats potentiels ϕ_{Min}^{per} . Cet écart entre le meilleur profit et le plus faible profit est un indicateur de la distribution des productivités des candidats en rationalité limitée. Conformément à la théorie de la recherche, plus cette distribution est étendue, plus les entreprises ont de chance de trouver un employé avec un meilleur profit. Elles sont donc plus exigeantes dans leur processus de recherche.
- $N(d_c) = N_2 + N_3 \times d_c$ est une fonction croissante de la durée du contrat c proposé pour le poste. N_2 et N_3 sont deux paramètres exogènes calibrés dans l'intervalle $[0, 1]$. Nous supposons que les entreprises sont plus exigeantes dans leur processus de recrutement pour des contrats les plus longs, qui impliquent de garder un salarié plus longtemps en poste.
- $TIGH_{q,t}$, la tension sur le marché du travail pour les postes de niveau de qualification q . Plus cette tension est élevée, plus les entreprises doivent baisser leurs exigences pour espérer trouver un candidat.
- La fonction H est une fonction logistique qui module ce facteur de tension dont les valeurs sont comprises entre 0.8 et 1.2 et donnée par la formule $H(x) = 0.8 + \frac{0.4}{1+20 \times e^{-3x}}$.

2.6.2 Phase A - Étape 2 : Destruction de postes vacants

Nous avons vu dans la section précédente, que le cas où la marge de demande pour un niveau de qualification q , $DM_{j,q,t}$ est supérieure à DT , l'entreprise envisage de créer de nouveaux postes du niveau de qualification q .

Dans cette deuxième étape, si l'entreprise observe pour un niveau de qualification q , $DM_{j,q,t} < -DT$, elle commence par envisager de supprimer des postes vacants pour ajuster sa marge de demande.

On rappelle en effet que $DM_{j,q,t} = D_{j,q,t} - (Q_{j,q,t}^{eff} + Q_{j,q,t}^*)$, avec $Q_{j,q,t}^{eff}$ la production effective du niveau de qualification q et $Q_{j,q,t}^*$ la production totale espérée des postes vacants en attente d'être pourvus (cf. section 2.5.2.2). Donc une suppression de postes vacants est un premier ajustement entre son niveau d'emploi effectif et son niveau d'emploi cible au niveau de qualification q que l'entreprise peut réaliser sans coût ni besoin de justification légale.

Ajustement de la marge de demande Pour chaque niveau de qualification q , si $DM_{j,q,t} < -DT$, l'entreprise supprime son plus ancien poste vacant qui passe alors dans l'état *en attente*. La production attendue pour ce poste vacant qui était allouée au moment de sa création $Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$ est ajoutée à la marge de demande : $DM_{j,q,t} \leftarrow DM_{j,q,t} + Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$. Cet ajustement permet d'économiser les coûts de vacance du poste payés chaque période (cf section 2.3.3.6). L'entreprise supprime d'autres postes aléatoirement tant que $DM_{j,q,t} < -DT$.

Suppression des offres d'emploi non pourvues Par ailleurs, un poste qui reste vacant après VD_{c,d_c} périodes est détruit. Ce délai est fixé de façon exogène et dépend du type de contrat c et de la durée initiale du contrat d_c .

Suppression des postes dans l'état *en attente* sans contrat Un poste dans l'état *en attente* pour lequel aucun contrat n'est affecté après une durée de PD est détruit.

2.6.3 Phase A - Étape 3 : Gestion des salariés

Chaque période de la simulation, l'entreprise procède à des évaluations de ses salariés dans les cas suivants :

- Si un employé est en fin de période d'essai, l'entreprise effectue un bilan depuis son entrée sur le poste pour savoir si elle le titularise ou bien s'en sépare
- Tous les ans à la date d'anniversaire d'un salarié, l'entreprise effectue une évaluation annuelle du salarié. Si l'entreprise constate une insuffisance professionnelle, elle procède éventuellement à un licenciement pour motif personnel.
- En fin de mission d'un contrat temporaire pour savoir si le contrat est renouvelé, arrêté ou bien si l'employé est titularisé avec un contrat permanent

De plus à chaque période de la simulation un salarié a une probabilité Psm , paramètre exogène fixé, d'avoir effectué une faute grave. Dans ce cas il est immédiatement licencié sans délai de préavis ni indemnité de licenciement.

2.6.3.1 Évaluation en fin de période d'essai et évaluation annuelle du salarié en CDI

Bilan du salarié L'entreprise effectue un bilan du salarié sur une période d'un an (52 périodes) dans le cas d'une évaluation annuelle et du temps depuis l'entrée de l'individu sur le poste dans le cas d'une évaluation en fin de période d'essai. Cette période est notée D^{eval} .

L'estimation de la productivité effective sur ces D^{eval} périodes est :

$$Q_{i,j,q,t}^{eval} = \sigma_{i,p,q,t}^{Eval} \times \sum_{d=1}^{D^{eval}} Q_{i,j,q,t-d}^{eff} \quad (2.51)$$

On rappelle que $\sigma_{i,p,q,t}^{Eval}$ représente le niveau d'incertitude de l'entreprise pour évaluer un salarié (cf. section 2.5.2.2). L'entreprise calcule ensuite la somme des productions requises

pour ce poste sur cette même durée :

$$Q_{j,p,q,t}^{req} = \sum_{d=1}^{D^{eval}} Q_{j,p,q}^{base} \times F_{\beta}(HC_{Req,p}^{gen}(T-d), HC_{Req,p}^{occ}(T-d)) \times F_{\lambda}(HC_{Req,p}^{spec}(T-d)) \quad (2.52)$$

Avec $HC_{Req,p}^{gen}(T-d)$, le capital humain général requis après $(T-d)$ périodes, et T le temps passé par l'employé depuis l'embauche sur le poste. Il est égal au capital humain général requis au moment de la création du poste ($HC_{Req,p}^{gen}$) augmenté de l'évolution standard attendue avec l'expérience du salarié sur ces $(T-d)$ périodes.

$HC_{Req,p}^{gen}(T-d) = HC_{Req}^{gen} + T-d$. De même : $HC_{Req,p,q}^{occ}(T-d) = HC_{Req,q}^{occ} + T-d$ et $HC_{Req,p}^{spec}(T-d) = HC_{Req,p}^{spec} + T-d$.

Éléments de justification légale En France, d'après la Cour de cassation (Cour de cassation, 2008), "la période d'essai étant destinée à permettre à l'employeur d'apprécier la valeur professionnelle du salarié, est abusive sa rupture motivée par des considérations non inhérentes à la personne du salarié".

Nous supposons que l'entreprise constate une insuffisance professionnelle et dispose d'éléments de justification légale pouvant conduire à une fin de période d'essai si l'estimation de la productivité effective sur la période du bilan est inférieure à la productivité requise :

$$Q_{i,j,q,t}^{eval} < Q_{j,p,q,t}^{req} \quad (2.53)$$

Nous supposons qu'il est plus difficile de justifier le licenciement personnel d'un salarié en contrat permanent par rapport à une fin de période d'essai. En France, le licenciement d'ordre personnel repose sur la personne du salarié : son comportement, un insuffisance professionnelle... "Pour être valable, la cause du licenciement doit être à la fois réelle et sérieuse".

L'entreprise dispose d'éléments de justification légale dans le cas d'un licenciement personnel si :

$$Q_{i,j,q,t}^{eval} < \rho \times Q_{j,p,q,t}^{req} \quad (2.54)$$

Avec $\rho \in [0.7, 0.9]$ un paramètre exogène calibré.

Évaluation économique Si l'entreprise constate une insuffisance du salarié qu'elle peut justifier, elle procède à une évaluation économique pour savoir si elle a effectivement intérêt à licencier l'individu.

L'entreprise réévalue l'intérêt d'avoir cet individu sur ce poste. Pour cela, l'entreprise évalue le profit $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}$ avec l'individu i , son contrat c et son poste p comme dans l'annexe C avec quelques modifications car l'individu est déjà en poste :

— l'entreprise utilise la marge de demande qu'elle a sans ce poste : $DM_{j,t} \leftarrow DM_{j,t} + Q_{i,j,q,t}^{est}$.

Avec $Q_{i,j,q,t}^{est}$ la productivité estimée de l'individu sur le poste (cf. équation 2.41).

- Le coût de Formation TC est nul car l'individu dispose déjà des capitaux humains requis sur le poste
- Les coûts de vacance VC et le délai de vacance d_v sont nuls. L'entreprise ne doit pas prendre en compte de coûts de recrutement car l'individu est déjà sur le poste.
- l'incertitude sur la productivité du candidat est réduite $\sigma_{i,p,q,t}^{Eval} < \sigma_0$ car l'individu dispose d'ancienneté sur le poste (cf. équation 2.42).
- le facteur d'influence du taux de chômage sur la détermination du salaire qui intervient dans l'équation 18 est celui qui avait été déterminé au moment de la création de l'offre d'emploi associé au poste $G(U_{q,t=crea})$.
- à chaque durée possible de fin de contrat dans l'ensemble D_c^{option} est retranché le temps déjà passé par l'employé sur le poste. Par exemple pour un contrat en CDD de durée prévu 6 mois, si l'individu a déjà passé 1 mois sur le poste, la durée évaluée du contrat est la durée restante de 5 mois.
- Pour la détermination des coûts de fin de contrat $EndC_c(d_c)$ dans l'équation 20, c'est la durée totale depuis le début du contrat qui est prise en compte

Dans le cas d'une évaluation en fin de période d'essai, si $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot} < 0$, la firme se sépare du salarié en fin de période d'essai. Le poste n'est pas détruit et passe dans l'état *en attente*. L'entreprise pourra évaluer au tour suivant l'intérêt de recréer un nouveau contrat pour ce poste.

Dans le cas d'une évaluation d'un licenciement personnel, l'entreprise évalue le coût de licenciement personnel PFC (dont le calcul est détaillé dans l'annexe D) qu'elle doit payer si elle licencie immédiatement le salarié en tenant compte de l'ancienneté effective du salarié et des coûts de préavis. Ce coût n'est pas actualisé car il doit être payé immédiatement.

Si $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot} < -PFC$, la firme se sépare du salarié après une période de préavis qui dépend de la durée passée sur le poste. Le poste n'est pas détruit et passe dans l'état *en attente*. L'entreprise pourra évaluer au tour suivant l'intérêt de recréer un nouveau contrat pour ce poste.

2.6.3.2 Évaluations individuelles des salariés en fin de contrat temporaire

L'entreprise a trois possibilités :

- Scénario 1 : renouvellement du contrat temporaire (si le contrat est renouvelable)
- Scénario 2 : titularisation du salarié en contrat permanent
- Scénario 3 : résiliation du contrat et sortie du candidat de l'entreprise

Scénario 1 : la firme renouvelle le contrat temporaire Un contrat à durée déterminée est renouvelable en France une seule fois dans la limite de 18 mois. Si le contrat CDD est renouvelable (donc n'a pas déjà été renouvelé), l'entreprise évalue le profit par période $\phi_{i,j,p,q,CDD,t}^{per}$ avec l'individu i et ce même contrat CDD comme dans la section 2.6.3.1 :

Scénario 2 : la firme titularise le salarié en CDI La firme évalue le profit $\phi_{i,j,p,q,CDI,t}^{per}$ avec le même individu mais sur un contrat en CDI comme dans la section 2.6.3.1 .

Comparaison des trois scénarios Il y a trois possibilités :

1. Si $\phi_{i,j,p,q,CDI,t}^{per} > \phi_{i,j,p,q,CDD,t}^{per}$ et $\phi_{i,j,p,q,CDI,t}^{per} > 0$, dans ce cas l'entreprise titularise le salarié en CDI
2. Si $\phi_{i,j,p,q,CDD,t}^{per} > \phi_{i,j,p,q,CDI,t}^{per}$ et $\phi_{i,j,p,q,CDD,t}^{per} > 0$, dans ce cas l'entreprise renouvelle le contrat du salarié en CDD
3. Si $\phi_{i,j,p,q,CDD,t}^{per} < 0$ et $\phi_{i,j,p,q,CDI,t}^{per} < 0$, l'entreprise se sépare du salarié et le contrat n'est pas renouvelé. Le poste passe dans l'état *en attente* et CDD ne pourra pas être recréé sur le poste tant que le délai de carence WP_p n'est pas écoulé.

2.6.4 Phase A - Étape 4 : Licenciements et faillite

Tous les ans, l'entreprise évalue sa rentabilité financière. La première date du bilan est tirée de manière aléatoire, puis les bilans ont lieu tous les ans à partir de cette date. L'entreprise calcule son revenu annuel $R_{j,t}^{bilan}$ et son coût annuel $C_{j,t}^{bilan}$ (somme des profits et des coûts par période depuis un an) et évalue son état financier comme dans la section 2.3.2.3. Si l'entreprise est dans l'état *perte*, elle enclenche un processus de réduction de l'emploi (qu'elle peut justifier légalement).

Dans la réalité, d'après le droit du travail français, l'ordre des licenciements économiques est établi d'après les conventions collectives de travail ou suivant des critères légaux qui tiennent compte notamment (art. L. 1233-5 du code du travail) :

- des charges de famille
- de l'ancienneté dans l'entreprise
- de la situation des salariés qui présentent des caractéristiques sociales rendant leur réinsertion professionnelle particulièrement difficile, notamment celle des personnes handicapées et des salariés âgés
- des qualités professionnelles appréciées par catégorie

La modélisation de ces critères légaux ou conventionnels est très complexe, car ces critères peuvent varier d'une firme à l'autre. Pour simplifier, nous avons implémenté une procédure avec un ordre aléatoire.

Mise en place du plan de licenciement économique Tous les postes dans l'état *vacant* et dans l'état *en attente* de l'entreprise sont supprimés.

Ensuite pour chaque niveau de qualification q et tant que $DM_{j,q,t} < -DT$ la firme évalue ses salariés de chaque niveau de qualification dans un ordre aléatoire.

Chacune de ces évaluations se fait de la façon suivante. L'entreprise évalue le profit $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}$ avec l'individu i , son contrat c et sur le poste p comme dans la section 2.6.3.1. L'entreprise évalue le coût de licenciement économique EFC qu'elle doit payer si elle licencie immédiatement le salarié en tenant compte de l'ancienneté effective du salarié et des coûts de préavis.

Si $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot} < -EFC$, la firme se sépare du salarié après une période de préavis qui dépend de la durée passée sur le poste et le poste est détruit. Ce processus s'arrête dès que $DM_{j,q,t} > -DT$ ou dès que tous les salariés ont été évalués.

Faillite de l'entreprise Dans le cas où l'entreprise a un rendement en dessous du seuil PT et qu'elle n'a pas de salariés à licencier, le dirigeant "se licencie" lui-même, ce qui conduit dans ce cas à la faillite de l'entreprise qui disparaît de la simulation.

Pour conserver un nombre constant d'entreprises dans le modèle, nous choisissons aléatoirement un individu *actif* dans la simulation qui crée une nouvelle entreprise et se place dedans comme dirigeant.

2.6.5 Phase B - Étapes 5 : Décisions des individus de changer d'état

Nous passons maintenant à la phase B du cycle de la simulation avec les décisions des agents "individu" de changer d'état. L'évaluation d'un état est réalisée par un individu avec une fonction d'utilité comme présenté dans la section 2.5.1.

Cette phase B commence par une phase de prospection commune aux individus qui ne sont pas à la recherche d'un emploi (dans l'état *inactif* et *Employé PAE*) pour décider s'ils commencent une recherche.

Nous présenterons ensuite les décisions des individus dans chaque état : *Inactif*, *Chômeur*, *Employé PAE* et *Employé PARAE*.

2.6.5.1 Phase de prospection : calcul de l'utilité des emplois nouveaux

L'individu reçoit chaque mois et sans coût de recherche des informations concernant NPJ postes du marché du travail que l'individu pourraient potentiellement occuper.

Cette liste de postes connus est obtenue en tirant aléatoirement une liste d'emplois parmi les postes vacants de pôle emploi qui correspondent à la qualification actuelle de l'individu.

Ce n'est pas une recherche d'emploi proprement dite avec des offres d'emploi. A ce stade ce sont simplement des informations dont dispose l'individu sur les postes qu'il pourrait occuper. On peut supposer que ces informations sont communiquées par bouche à oreille, par relations personnelles, ou par affichage sur internet, sans que l'on donne une structure de réseau, ce qui pourrait être une extension du modèle.

Ces informations permettent à l'individu d'évaluer l'intérêt de commencer la recherche d'un emploi (ou bien de d'autres emplois si l'individu est déjà en poste).

On note $UTEMP_{i,p,t}$ l'utilité du poste p prospecté par l'individu i :

$$UTEMP_{i,p,t} = (In(S_{i,p,q,t}^{exp}) + St_{p,c})^{1-\alpha_{i,t}} (Ta - Tw)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.55)$$

Les éléments qui entre dans le calcul de $UTEMP_{i,p}$ sont :

- Le salaire $S_{i,p,q,t}^{exp}$ est déterminé à partir de la proposition de salaire associé à l'offre d'emploi, modulée par les caractéristiques de l'individu (capital humain). D'après l'équation

2.26, le salaire auquel pourra prétendre l'individu est :

$$S_{i,p,q,t}^{exp} = \text{Max}(SMIC, S_{j,p,q}^{base} \times F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \times F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec}) \times G(U_{q,t=crea})) \quad (2.56)$$

$S_{j,p,q}^{base}$ et $G(U_{q,t=crea})$ ont été déterminés au moment de la création de l'offre d'emploi et sont des éléments de rémunération de base du poste connus par l'individu.

Le facteur $F_{\lambda^*}(HC_{i,p,t}^{spec})$ n'intervient pas ici, car à ce stade l'individu n'a pas de capital humain spécifique sur le poste dans l'entreprise. $F_{\beta}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ})$ est le facteur lié à l'expérience de l'individu (*Curriculum vitae*). $HC_{i,t}^{gen}$ et $HC_{i,q,t}^{occ}$ sont les capitaux humains de l'individu sans prendre en compte les éventuelles formations dont pourra bénéficier l'employé et qui sont inconnus à ce stade. A partir de ce salaire attendu du poste, l'individu en déduit le nouveau revenu du ménage $ln(S_{i,p,q,t}^{exp})$ par unité de consommation connaissant les revenus des autres membres qui le composent. Ce nouveau revenu du ménage est calculé comme dans la section 2.5.1.1 en intégrant le nouveau revenu $S_{i,p,q,t}^{exp}$. A noter que ce nouveau revenu de l'individu peut entraîner la perte du RSA pour l'autre membre du ménage qui n'est plus éligible si son conjoint bénéficie de revenus d'activité (voir en l'annexe A pour le calcul du RSA).

- Le niveau d'aménité du poste prospecté est supposé nul (cf. section 2.5.1.1), car l'individu n'est pas dans l'entreprise et ne connaît pas par exemple l'ambiance de travail. L'aménité sera révélée pleinement si l'individu occupe le poste.
- $St_{p,c}$ est le facteur de stabilité lié au type de contrat proposé sur le poste (cf. section 2.5.1.1). Donc avec la prise en compte de ce facteur, à salaire égal l'individu évalue plus favorablement une offre d'emploi avec un contrat en CDI, plutôt qu'un contrat en CDD. C'est un facteur qui peut notamment motiver l'individu à changer d'emploi s'il se retrouve dans une situation précaire.

L'individu calcule ensuite la moyenne des utilités des emplois nouveaux prospectés selon cette équation :

$$UTNEW_{i,t} = \frac{\sum_{p=1}^{NPJ} UTEMP_{i,p}}{NPJ} \quad (2.57)$$

2.6.5.2 Le module de décision de l'individu dans l'état *inactif*

A chaque période de la simulation les individus dans l'état inactif prennent les décisions suivantes :

Décisions de commencer une recherche d'emploi Avant de commencer une recherche coûteuse en temps (et psychologiquement pénible), les individus dans l'état inactifs évaluent leur employabilité. L'employabilité correspond à la productivité espérée dans une autre entreprise modulée par $H(TIGH_{q,t})$, le facteur de tension sur le marché du travail pour les postes de qualification q :

$$EMPLOY_{i,t} = H(TIGH_{q,t}) \times Q_{i,q,t}^{eff} \quad (2.58)$$

Et comme dans l'équation 2.30 du calcul de $Q_{i,j,q,t}^{eff}$:

$$Q_{i,q,t}^{eff} = \mu_q \times kProd_i \times cond_{i,t} \times F_\beta(HC_{i,t}^{gen}, HC_{i,q,t}^{occ}) \quad (2.59)$$

μ_q est le niveau de production de base moyen des postes du niveau de qualification q dans les entreprises (cf. équation 2.5). Le facteur $F_\lambda(HC_{i,p,t}^{spec})$ n'intervient pas ici, car à ce stade l'individu n'a pas de compétences pour un poste précis. Cette compétence spécifique ne dépend que de la formation et de l'ancienneté.

Mécanisme décisionnel L'individu compare cette valeur d'employabilité à un seuil $ET \in [0, 1000]$, un paramètre exogène calibré, pour décider de commencer ou non une recherche.

- Si $EMPLOY_{i,t} < ET$
→ Alors ne pas commencer la recherche.
- Si $EMPLOY_{i,t} \geq ET$
→ Alors poursuivre l'étude de la décision.

Cette décision préliminaire se justifie surtout par l'existence de nombreux inactifs qui se jugent absolument inemployables dans le cadre du marché existant, et de salariés qui savent qu'ils ne parviendront pas à se faire embaucher dans une autre entreprise (Lewkowicz, 2010).

Décision de commencer une recherche d'emploi L'inactif compare l'utilité de son état présent $UTINA_{i,t}$ avec l'utilité qu'il pourrait espérer avoir s'il occupait un emploi $UTNEW_{i,t}$. L'utilité d'être inactif est $UTINA_{i,t} = (In(RSA))^{1-\alpha_{i,t}} (Ta)^{\alpha_{i,t}}$

- Si $UTNEW_{i,t} < ICHANG \times UTINA_{i,t}$
→ L'individu renonce à la recherche
- Si $UTNEW_{i,t} \geq ICHANG \times UTINA_{i,t}$
→ L'individu décide de chercher un emploi et devient chômeur

$ICHANG \in [1, 2]$ est le paramètre exogène calibré de gain d'utilité que doit procurer un nouvel état pour que l'individu décide d'en changer. Il exprime l'inertie, ou le coût psychologique du changement.

Après avoir évalué l'employabilité et l'intérêt de la recherche, si l'inactif choisit de chercher un emploi, il doit fixer un niveau d'utilité de réservation (niveau d'aspiration) $UTRES_{i,t}$ qu'il comparera à l'utilité de chaque emploi prospecté pour décider s'il est candidat ou non.

L'utilité de réservation de l'individu est symétrique de la norme d'embauche pour les entreprises (cf. équation 2.6.1.1). Elle est initialisée à :

$$UTRES_{i,t} = Ru_1 \times (UTNEW_{i,t} + Ru_2(UMAX_{i,t} - UMIN_{i,t})) \quad (2.60)$$

Avec :

- $Ru_1 \in [0, 2]$ un paramètre exogène calibré
- $Ru_2 \in [0, 1]$ un paramètre exogène calibré de sensibilité l'écart entre $UMIN_{i,t}$ et $UMAX_{i,t}$ les utilités minimale et maximale des emplois connus. Cet écart entre le meilleur profit et le plus faible profit est un indicateur de la distribution des utilités des postes connus en rationalité limitée. Conformément à la théorie de la recherche, plus cette distribution est étendue, plus les individus ont de chance de trouver un emploi avec une meilleure utilité. Ils sont donc plus exigeants dans leur processus de recherche.

La fixation de $UTRES_{i,t}$ clôt cette phase de décision de l'inactif, qui débouche sur une recherche d'emploi. L'inactif change son état et devient chômeur.

Synthèse de l'algorithme de décision de l'inactif La synthèse de l'algorithme de décision de l'inactif est présenté sur l'algorithme 2.

Algorithm 2 Synthèse de l'algorithme de décision de l'inactif

```

1: si  $EMPLOY_{i,t} \geq ET$  alors
2:   si  $UTNEW_{i,t} \leq ICHANG \times UTINA_{i,t}$  alors
3:     rester Inactif();
4:   sinon
5:     devenir chomeur();
6:     commencer à chercher un emploi();
7:   fin si
8: sinon
9:   rester Inactif();
10: fin si

```

2.6.5.3 Le module de décision de l'individu dans l'état *chômeur*

Calcul de l'utilité d'être chômeur $UTUEM_{i,t}$ Le chômeur calcule tout d'abord l'utilité de son état présent :

$$UTUEM_{i,t} = (In(UBEN_{i,t}))^{1-\alpha_{i,t}} (Ta - NSJ_U \times DSJ)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.61)$$

$NSJ_U \times DSJ$ est le temps de la recherche d'emploi. $UBEN_{i,t}$ est l'assurance chômage que perçoit le chômeur. Dans le cas où l'individu remplit ces conditions, il perçoit l'allocation de chômage qui est calculée à partir du montant qu'il a cotisé quand il était en emploi. Le détail du calcul de cette allocation ainsi que les conditions d'éligibilité sont décrits dans l'annexe A. Si le chômeur n'est pas éligible à l'allocation chômage, il peut éventuellement percevoir le RSA.

Choix d'arrêter la recherche d'un emploi Chaque période le chômeur met à jour son utilité de réservation $UTRES_{i,t}$ qui était initialisée au moment de son passage au statut de chômeur par l'équation 5.4.1.3 :

$$UTRES_{i,t} = UTRES_{i,t-1} \times (1 - Ru_3) + Ru_4 \times (UTUEM_{i,t} - UTUEM_{i,t-1}) \quad (2.62)$$

Avec $Ru_3 \in [0, 0.005]$ un paramètre exogène calibré. Nous distinguons l'utilité du chômage statique $UTUEM_{i,t}$ résultant des revenus dans la période (allocations chômage, RSA...) et du temps libre, et une utilité dynamique $UTRES_{i,t}$ conforme à la théorie de la recherche qui prend en compte l'espérance de l'obtention d'un emploi avec un certain salaire espéré.

L'utilité de réservation $UTRES_{i,t}$ est cependant influencée par l'évolution de $UTUEM_{i,t}$ qui peut changer pendant la prospection d'un emploi si les allocations de l'individu ou les revenus de son ménage changent. Par exemple un individu qui perd ses droits à l'allocation chômage voit son utilité du chômage $UTUEM_{i,t}$ baisser subitement ce qui entraîne immédiatement une baisse de l'utilité de réservation avec l'équation ci-dessus 2.62, car le chômeur baisse rapidement ses exigences pour trouver un emploi.

Si l'utilité de devenir inactif $UTINA_{i,t}$ devient supérieure à la fois aux utilités $UTUEM_{i,t}$ et $UTRES_{i,t}$, alors le chômeur arrête sa recherche et passe dans l'état *inactif*. Sinon il poursuit sa recherche en tant que chômeur.

Déclassement du chômeur Si l'individu reste au chômage un nombre de périodes $TimeU$ plus grand que $FailT \in [0, 1000]$, un paramètre exogène calibré, le chômeur se décline et cherche un emploi d'un niveau de qualification inférieur.

Algorithm 3 Décision du chômeur

```

1: si  $UTINA_{i,t} \leq \text{Max}(UTUEM_{i,t}, UTRES_{i,t})$  alors
2:   rester Chomeur();
3:   continuer à chercher un emploi();
4: sinon
5:   arrêter de chercher un emploi();
6:   devenir Inactif();
7: fin si
8: si  $TimeU > FailT$  alors
9:   chercher un emploi d'un niveau de qualification inférieur();
10: fin si

```

Synthèse de l'algorithme de décision du chômeur

2.6.5.4 Le module de décision de l'individu dans l'état employé PARAE

Calcul de l'utilité de l'emploi présent $UTOJS_{i,p,t}$ pour un PARAE L'utilité de l'individu dans l'état *Employé-PARAE* est :

$$UTOJS_{i,p,t} = (\text{In}(S_{i,j,p,q,t}^{eff}) + A_{p,q} + St_{p,c})^{1-\alpha_{i,t}} (Ta - Tw - NSJ_O \times DSJ)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.63)$$

avec $A_{p,q}$ l'aménité se son emploi, $S_{i,j,q,t}^{eff}$ son salaire effectif et $St_{p,c}$ la stabilité de son contrat. Ta est le temps disponible par période, Tw , le temps de travail et $NSJO \times DSJ$, le temps de recherche d'un nouvel emploi en tant que PARAE (cf. section 2.5.1).

Choix d'arrêter la recherche d'un autre emploi Comme pour le chômeur, chaque période le PARAE met à jour son utilité de réservation $UTRES_{i,t}$ (qui est initialisée au moment de son passage du statut d'employé PAE à PARAE par l'équation 2.72) selon :

$$UTRES_{i,t} = UTRES_{i,t-1} \times (1 - Ru_3) \quad (2.64)$$

L'individu arrête de chercher un autre emploi si cette utilité de réservation tombe en dessous du seuil de l'utilité de son emploi sans effectuer de recherche $UTEMP_{i,p,t}$. Dans ce cas, il abandonne sa recherche et devient *employé PAE*.

Decision de devenir inactif Il compare son utilité avec l'utilité d'être inactif $UTINA_{i,t} = (In(RSA))^{1-\alpha_{i,t}} (Ta)^{\alpha_{i,t}}$. Si $UTINA_{i,t} > UTOJS_{i,p,t}$, alors l'individu démissionne et se retire du marché du travail

Algorithm 4 Décision du PARAE

- 1: **si** $UTRES_{i,t} < UTEMP_{i,t}$ **alors**
 - 2: arreter de chercher un autre emploi;
 - 3: devenir PAE()
 - 4: **fin si**
 - 5: **si** $UTINA_{i,t} > UTOJS_{i,p,t}$ **alors**
 - 6: démissionner();
 - 7: devenir Inactif());
 - 8: **fin si**
-

Synthèse de l'algorithme de décision du salarié PARAE

2.6.5.5 Le module de décision de l'individu dans l'état *employé PAE* (non-PARAE)

L'utilité de l'emploi présent de l'individu est :

$$UTEMP_{i,p,t} = (In(S_{i,j,q,t}^{eff}) + A_{p,q} + St_{p,c})^{1-\alpha_{i,t}} (Ta - Tw)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.65)$$

avec $A_{p,q}$ l'aménité se son emploi, $S_{i,j,q,t}^{eff}$ son salaire effectif et $St_{p,c}$ la stabilité de son contrat. Tw est son temps de travail par semaine.

Évaluation de l'intérêt de commencer la recherche d'un autre emploi L'employé compare l'utilité de son état présent $UTEMP_{i,p,t}$ avec l'utilité $UTNEW_{i,t}$ qu'il pourrait espérer avoir s'il occupait un emploi .

Si $UTNEW_{i,t} \geq ICHANG \times UTEMP_{i,p,t}$ l'individu décide de commencer une recherche d'un autre emploi.

Choix d'une recherche comme PARAE ou comme chômeur (Ballot, 2002; Lewkovicz, 2010)

Évaluation des utilités de démission ou de devenir PARAE Si l'individu décide de chercher un emploi, il doit prendre une troisième décision avant de commencer cette recherche. Cette décision porte sur le choix entre la recherche comme PARAE ou bien comme chômeur après avoir démissionné. Comme la recherche d'emploi prend du temps, une démission peut être avantageuse. Toutefois, en restant PARAE, il peut éviter une diminution trop radicale de son temps libre en cherchant moins intensivement qu'un chômeur. Le nombre de postes rencontrés par un PARAE par période est une fraction du nombre de postes rencontrés par un chômeur. Le temps nécessaire pour prospecter un seul emploi est défini par DSJ , paramètre exogène fixé.

Soit NSJ_U et NSJ_O le nombre d'emplois prospectés respectivement par un chômeur et par un salarié PARAE. La durée attendue de la recherche est inversement proportionnelle au nombre de prospections. Soit TS la durée de recherche en nombre de périodes, lorsque l'on fait une prospection par période. La durée attendue est $\frac{TS}{NSJ_U}$ pour un chômeur et $\frac{TS}{NSJ_O}$ pour un PARAE. La durée attendue de la recherche pour un PARAE excède celle d'un chômeur de $TS \times (NSJ_O - NSJ_U)$.

Le chômeur a une utilité $UTUEM_{i,t}$ faible par période pendant une durée attendue $\frac{TS}{NSJ_U}$, puis une utilité attendue $UTNEW_{i,t}$. Le PARAE a une utilité $UTOJS_{i,t}$ par période pendant une durée plus longue $\frac{TS}{NSJ_O}$, comme le montre la Figure 2.11.

On calcule par période :

$$UTOJS_{i,t} = (In(S_{i,j,q,t}^{eff}) + A_{p,q} + St_{p,c})^{1-\alpha_{i,t}} (Ta - Tw - DSJ \times NSJ_O)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.66)$$

Et

$$UTUEM_{i,t} = (UBEN)^{1-\alpha_{i,t}} (Ta - DSJ \times NSJ_U)^{\alpha_{i,t}} \quad (2.67)$$

$UBEN$ est l'assurance chômage que percevrait l'individu s'il devenait chômeur. L'individu étant dans l'état employé PARAE, il ne peut atteindre l'état chômeur qu'en démissionnant. Dans ce cas, il ne percevra pas d'allocation chômage, mais pourra percevoir le RSA.

L'utilité de la démission est :

$$UTQUI_{i,t} = TS \times \frac{UTUEM_{i,t}}{NSJ_U} + TS \times \left(\frac{1}{NSJ_O} - \frac{1}{NSJ_U} \right) \times UTNEW_{i,t} \quad (2.68)$$

L'utilité de rester en emploi pour chercher un nouvel emploi en tant que salarié PARAE est :

$$UTSTAY_{i,t} = TS \times \frac{UTOJS_{i,t}}{NSJ_O} \quad (2.69)$$

L'inconnue TS peut être éliminée des deux expressions ci-dessus afin d'effectuer une comparaison. On calcule donc, l'utilité de la démission :

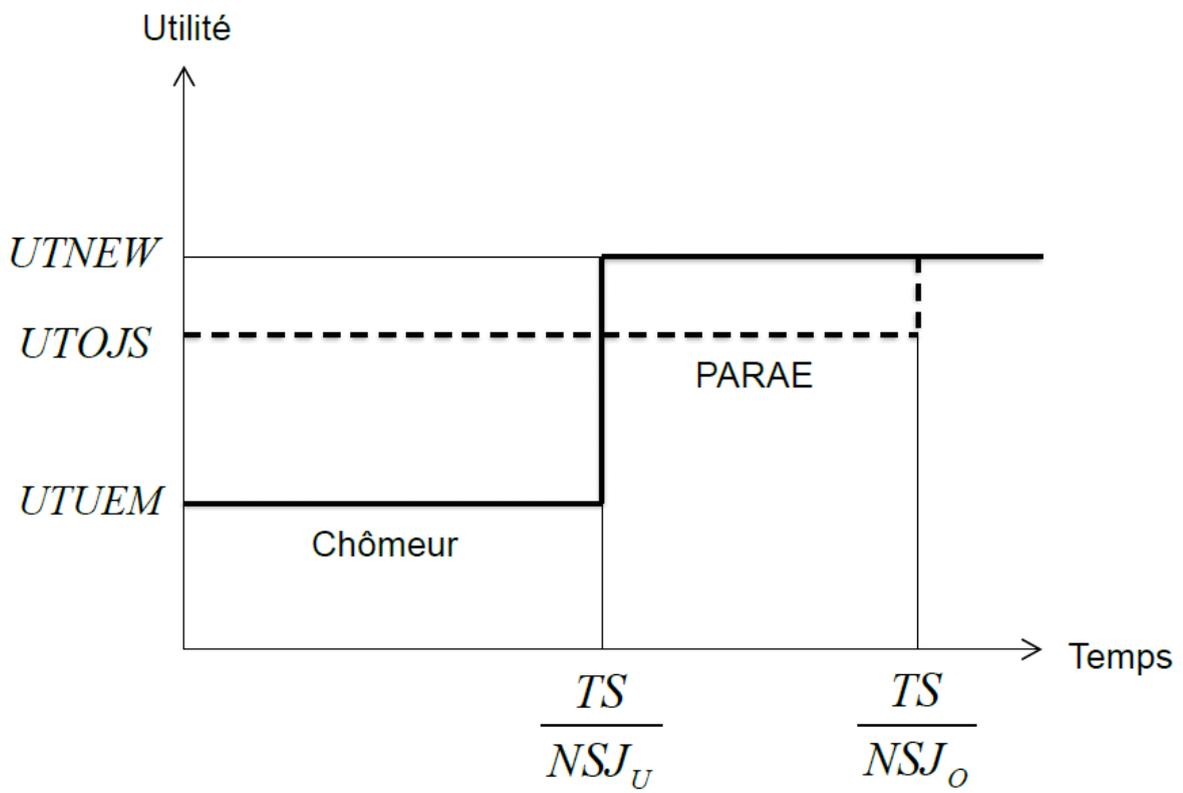


FIGURE 2.11 – Utilité de chercher un emploi

$$UTQUI_{i,t} = \frac{UTUEM_{i,t}}{NSJU} + \left(\frac{1}{NSJO} - \frac{1}{NSJU} \right) \times UTNEW_{i,t} \quad (2.70)$$

Et

$$UTSTAY_{i,t} = \frac{UTP_{i,t}}{NSJO} \quad (2.71)$$

Si $UTQUI_{i,t} > UTSTAY_{i,t}$ alors l'individu démissionne pour devenir chômeur. Si $UTSTAY_{i,t} \geq UTQUI_{i,t}$, l'individu devient PARAE.

Décision de devenir inactif Dans un deuxième temps, l'individu compare l'utilité de son emploi présent avec l'utilité d'être inactif $UTINA_{i,t} = (In(RSA))^{1-\alpha_{i,t}} (Ta)^{\alpha_{i,t}}$.

Si $UTEMP_{i,p,t} < UTINA_{i,t}$ alors l'individu démissionne et se retire du marché du travail.

Synthèse de l'algorithme de décision du salarié PAE La synthèse de l'algorithme de décision du salarié PAE est présenté sur l'algorithme 5.

Algorithm 5 Décision de l'employé PAE (non-PARAE)

```

1: si EMPLOYi,t ≥ ET alors
2:   si UTNEWi,t > UTEMPi,t × ICHANG alors
3:     si UTQUIi,t > UTSTAYi,t alors
4:       démissionner();
5:       devenir chômeur();
6:     sinon
7:       devenir PARAE();
8:       commencer à chercher un autre emploi();
9:     fin si
10:  fin si
11: fin si
12: si UTEMPi,t ≥ UTINAi,t alors
13:   devenir Inactif();
14: fin si

```

Mise à jour des variables internes de l'agent en cas de changement d'état De la même manière que pour l'inactif qui commence une recherche d'emploi (cf. section 2.6.5.2), dans le cas d'une démission et du passage à l'état de chômeur ou bien du passage à l'état de PARAE, l'utilité de réservation de l'individu est initialisée à :

$$UTRES_{i,t} = Ru_1^* \times (UTNEW_{i,t} + Ru_2(UMAX_{i,t} - UMIN_{i,t})) \quad (2.72)$$

Avec $Ru_1^* \in [0, 2]$, un paramètre exogène. $UMIN_{i,t}$ et $UMAX_{i,t}$ sont les utilités minimale et maximale des emplois connus.

Dans le cas d'un licenciement, $UTRES_{i,t}$ est initialisé à $UTEMP_{i,p,t}$, utilité de l'emploi présent. L'individu n'a pas d'autre exigence que de retrouver un emploi avec au moins le même niveau d'utilité.

2.6.5.6 Schéma récapitulatif des décisions des individus de passage d'un état à un autre

Nous présentons sur la figure 2.12, un diagramme de synthèse des décisions des individus dans les états *inactif* (cf. section 2.6.5.2), *chômeur* (cf. section 2.6.5.3), *Employé PARAE* (cf. section 2.6.5.4) et *Employé PAE* (cf. section 2.6.5.4).

Les décisions des individus dans chaque état sont représentées avec des flèches de couleurs différentes. Les flèches avec des tirets représentent les décisions qui ne dépendent pas directement de l'individu (i.e. prises par la firme) mais qui peuvent aussi occasionner un changement d'état pour l'individu.

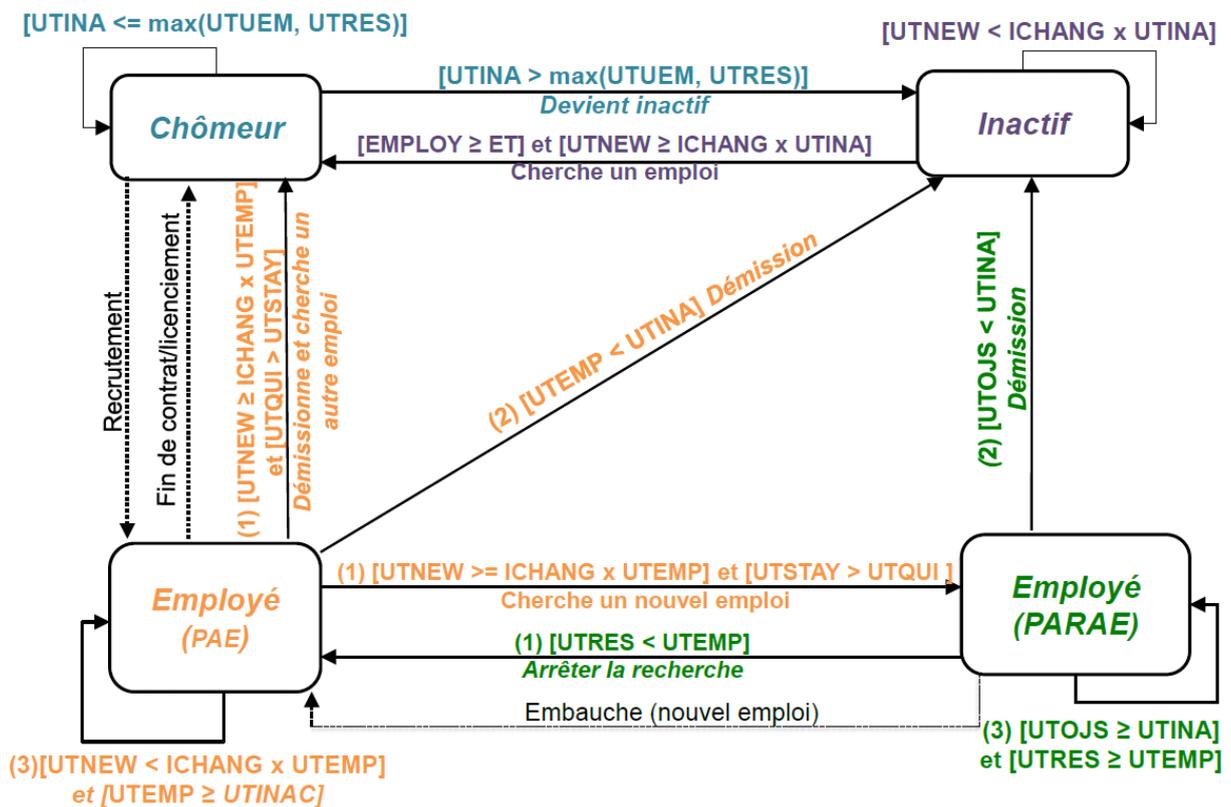


FIGURE 2.12 – Diagramme d'états décrivant les transitions principales des individus et leurs processus de décision. Légende : $UTINA$: utilité d'être inactif. $UTNEW$: utilité d'un nouvel emploi estimée par prospection. $UTUEM$: utilité d'être chômeur. $UTRES$: utilité de réservation. $UTOJTS$: utilité d'être PARAE (On-the-job-search). $UTEMP$: utilité d'être employé. $UTIQUI$: utilité de la démission. $ICHANG$: coût psychologique face au changement (paramètre exogène calibré). $EMPLOY$: mesure de l'employabilité pour un inactif.

2.6.5.7 Phase B - Étape 6 : Processus de recherche d'emploi

Chaque période, les individus dans l'état *chômeur* ou employé *PARAE* effectuent une recherche d'emploi. Ils demandent à *JobAds* une liste de N postes vacants correspondant à leur qualification et à un niveau de qualification supérieur.

Nous supposons que les arrivées de ces offres d'emploi se produisent avec une fréquence moyenne connue et indépendamment du temps écoulé depuis l'arrivée de la dernière offre. Nous modélisons ainsi le nombre d'offres reçues par période par un chercheur d'emploi avec une loi de Poisson. Pour un chômeur, ce nombre $NV_{i,t}$ d'emplois vacants obtenus est tiré aléatoirement suivant une distribution de poisson de paramètre λ avec :

$$\lambda = NSJ_U \times H(TIGH_{q,t}) \quad (2.73)$$

avec NSJ_U le nombre d'emplois vacants moyen reçus par période par un chômeur. $TIGH_{q,t}$ est la tension sur le marché du travail à l'instant t pour les postes de niveau de qualification q .

Pour un *PARAE*, ce nombre $NV_{i,t}$ d'emplois vacants obtenus est tiré aléatoirement suivant une distribution de poisson de paramètre

$$\lambda = NSJ_O \times H(TIGH_{q,t}) \quad (2.74)$$

Chacun de ces emplois a une probabilité $PrBQ \in [0, 1]$, paramètre exogène calibré, d'être d'un niveau de qualification supérieur. En cas d'embauche le niveau de qualification de l'individu augmente.

L'individu postule chaque période à la première offre parmi les $NV_{i,t}$ qu'il reçoit au temps t et qui dépasse son utilité de réservation $UTRES_{i,t}$.

2.6.5.8 Candidatures aux promotions en interne dans l'entreprise

Les individus employés *PARAE* ou *PAE*, dont l'ancienneté dans l'entreprise dépasse un seuil $SenT \in [0, 1000]$, paramètre calibré, postulent automatiquement aux offres internes de leur entreprise dont le grade est strictement un cran au dessus de leur propre niveau de qualification.

2.6.6 Phase C - Étape 8 et 9 : Processus de recrutement et promotions

Pour chaque emploi vacant p qui a reçu des candidatures pendant cette période, la firme calcule un profit pour chaque candidat i (interne ou externe), puis le meilleur candidat est désigné. Par la suite, la firme vérifie que ce candidat passe la norme d'embauche du poste. Si c'est le cas, le candidat est embauché, dans le cas contraire, le poste reste vacant.

Calcul du profit avec un candidat L'entreprise calcule le profit $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ avec chaque candidat i comme dans l'annexe C avec quelques modifications :

- Le niveau de marge de demande utilisé dans l'évaluation est composé de la marge de demande à t de l'entreprise à laquelle s'ajoute la marge de demande $Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$ qui était allouée pour le poste vacant au moment de sa création : $DM_{j,t} + Q_{j,p,q,c,t=crea}^{avg}$
- Les coûts de vacance c_v et le délai de vacance d_v sont nuls
- le facteur d'influence du taux de chômage sur la détermination du salaire qui intervient dans l'équation 18 est celui qui avait été déterminé au moment de la création de l'offre d'emploi $G(U_{q,t=crea})$.

Passage de la norme d'embauche Si le profit du meilleur candidat dépasse la norme d'embauche calculée au moment de la création du poste dans la section 2.6.1.1, $HNorm_{j,p,q,t=crea}$, alors l'individu est embauché.

Formation de l'individu sur le poste Si un individu est embauché sur le poste, il est alors formé. S'il n'a pas les niveaux de capitaux humains requis sur le poste, il les reçoit pendant cette formation :

$$HC_{i,t}^{gen} \leftarrow \text{Max}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{req,p}^{gen}) \quad (2.75)$$

$$HC_{i,q,t}^{occ} \leftarrow \text{Max}(HC_{i,q,t}^{occ}, HC_{req,q}^{occ}) \quad (2.76)$$

$$HC_{i,p,t}^{spec} \leftarrow HC_{req,p}^{spec} \quad (2.77)$$

Mise à jour de la norme d'embauche A la fin de la période, la norme d'embauche des emplois vacants de l'entreprise qui ne sont pas pourvus décroît d'un pourcentage N_4 , mais ne descend jamais en dessous de 0 :

$$HNorm_{j,q,t+1} = \text{max}(HNorm_{j,q,t} \times (1 - N_4), 0) \quad (2.78)$$

avec $N_4 \in [0, 0.2]$, un paramètre exogène calibré de décroissance de la norme d'embauche chaque période.

2.6.7 Phase D - Étape 9-13 : Le module démographique

Nous avons choisi de rechercher un état stationnaire du modèle pour la France en 2011 (cf. section 2.1).

Nous souhaitons reproduire et maintenir constant un ensemble de caractéristiques démographiques importantes de la France en 2011 :

- la répartition des individus par mode de cohabitation et par âge suivant la répartition de 2011 (INSEE, 2011g).
- la part d'individus retraités par âge suivant les données de (INSEE, 2011f)
- le nombre total d'individus en âge de travailler de 15 à 65 ans en 2011
- la part d'individus étudiants par âge en 2011 (INSEE, 2011m).

La conservation de ces caractéristiques démographiques n'est bien sûr pas observée dans la réalité car les flux réels (par exemple le taux réel d'entrée sur le marché du travail et le taux réel de départ à la retraite) déforment cette répartition au fil du temps.

Nous choisissons de simplement conserver ces éléments démographiques, à mesure que les agents vieillissent dans le modèle, sans pour autant viser à reproduire les flux démographiques réels.

L'ensemble de ces processus démographiques est présenté dans l'annexe E :

- L'évolution des ménages
- Les départs en retraite et préretraite
- L'entrée de nouveaux agents
- le vieillissement et le décès des agents

2.7 Bilan du chapitre

Nous avons présenté dans cette section le modèle multi-agent du marché du travail Work-Sim. Dans ce modèle, deux catégories d'agents hétérogènes et autonomes sont en interaction, des agents "individu" et des agents "entreprise privée". Les agents ont chacun des attributs spécifiques, déterminés une fois pour toute à leur création, ainsi que des variables internes qui évoluent tout au long de la simulation. Ces deux catégories d'agent évoluent dans un environnement composé d'un module institutionnel qui comprend les principaux éléments du droit du travail (contrats de travail CDD et CDI, indemnités de licenciement, ...) et de trois *artifacts* :

- l'*État* qui recrute des fonctionnaires
- *JobAds*, qui répertorie d'un côté les offres d'emploi des entreprises et les demandes d'emploi des individus.
- un *institut de la statistiques* qui diffuse un nombre limité de données statistiques aux agents

Chaque agent du modèle a un objectif :

- pour l'agent "individu", il s'agit de trouver un état satisfaisant en terme de niveau d'utilité. L'individu évalue un état avec une fonction d'utilité qui consiste en une agrégation de plusieurs critères (revenu, stabilité, aménité et temps libre)
- pour l'agent "entreprise privée", il s'agit de faire des profits

Pour satisfaire son objectif, l'agent dispose d'un nombre d'informations limitées sur son environnement, il peut prendre des décisions (en rationalité limitée) et interagir avec les autres agents du modèle.

Le cycle de la simulation se décompose en quatre phases : A) Décisions économiques des entreprises ; B) Décisions des individus ; C) Recrutements et Promotions et D) Processus démographiques. Chaque période représente une semaine dans la réalité.

Les apports de WorkSim pour les systèmes multi-agents sont les suivants :

- concernant la modélisation des décisions des individus, nous utilisons le principe d'une *machine à état* avec des agents qui prennent des décisions en rationalité limitée pour changer de situation. Ce processus permet une représentation simple des choix d'un individu entre un nombre fini d'états possibles suivant le principe de seuils de satisfaction (*Satisficing*) de (Simon, 1956).
- nous avons mis au point un processus d'anticipation à horizon fini qui est au cœur des décisions des firmes dans le modèle. Cette modélisation est *une alternative à l'introduction de mécanismes d'apprentissage* qu'il serait difficile à mettre en œuvre dans ce cas pour deux raisons : d'une part, le nombre d'états possibles pour une firme est très important, et d'autre part, les firmes ne rencontrent pas assez d'événements pour que l'apprentissage soit pertinent. Par exemple, les licenciements économiques sont rares, et il serait très long d'apprendre le coût d'un licenciement économique par essai et erreur. La firme projette plutôt des scénarios qui lui permette d'évaluer le risque et le coût d'un licenciement, sans en avoir forcément déjà vécu un.

Nous détaillerons les apports du modèle WorkSim dans le chapitre de conclusion de cette thèse.

Par ailleurs, le modèle WorkSim est conçu pour être extensible et applicable à l'étude du marché du travail d'un autre pays, qui possède un cadre institutionnel et démographique différent. Dans l'annexe J, nous donnons des pistes qui permettraient d'étendre le modèle WorkSim pour étudier le marché du travail sénégalais.

Chapitre 3

Conception et implémentation du modèle informatique WorkSim

Le modèle WorkSim présenté dans le chapitre précédent est un outil de simulation basé sur la méthodologie des systèmes multi-agents. Nous exposons dans ce chapitre la conception de la plateforme de simulation. Pour cela nous décrirons la structure du modèle informatique et l'architecture des agents. Il s'agira aussi de préciser les interactions possibles entre ces entités informatiques. Nous présenterons enfin le développement d'outils pour explorer et analyser le modèle.

3.1 Conception de la plateforme de simulation

La première version du modèle WorkSim (Lewkovicz, 2010) était développée sur la plateforme *Repast3.1* (North *et al.*, 2006), implémentée en Java. Cette plateforme permet de modéliser des agents et d'exécuter leurs actions en trois étapes à chaque période (*prestep*, *step*, *poststep*). Elle offre aussi une interface graphique qui permet de lancer la simulation et de visualiser les sorties du modèle.

Cependant nous avons relevé plusieurs inconvénients :

- les outils graphiques de visualisation en temps réel de la simulation sont limités
- la plateforme n'offre pas de méthodes pour calibrer le modèle
- le lancement en parallèle des simulations n'est pas prévu dans le mode *Batch*
- les possibilités d'exportation des données sont limitées
- la plateforme *Repast3.1* n'est plus maintenue à ce jour

Pour ces raisons, il nous a paru plus simple de supprimer la dépendance à la plateforme *Repast3.1*. Nous avons reconstruit le modèle uniquement en Java, langage orienté objet. Le fait de ne pas dépendre d'une plateforme multi-agent existante permet une grande portabilité du modèle et facilite les extensions futures du programmes. L'avantage est aussi de pouvoir maîtriser complètement les processus d'ordonnancement séquentiels des agents dans le modèle et la gestion de l'aléatoire.

Le développement en Java facilite la communication scientifique, car ce langage informatique est un des plus répandus dans le monde.

3.1.1 Structure du modèle informatique

Comme nous l'avons indiqué au chapitre précédent nous avons choisi de dissocier les *agents* des *artifacts*, afin de distinguer les entités ce qui sont proactives de celle qui ne le sont pas.

Le diagramme de classe général qui décrit la structure du modèle WorkSim avec les *agents* (en vert) et les *artifacts* (en bleu) est présenté sur la figure 3.1.

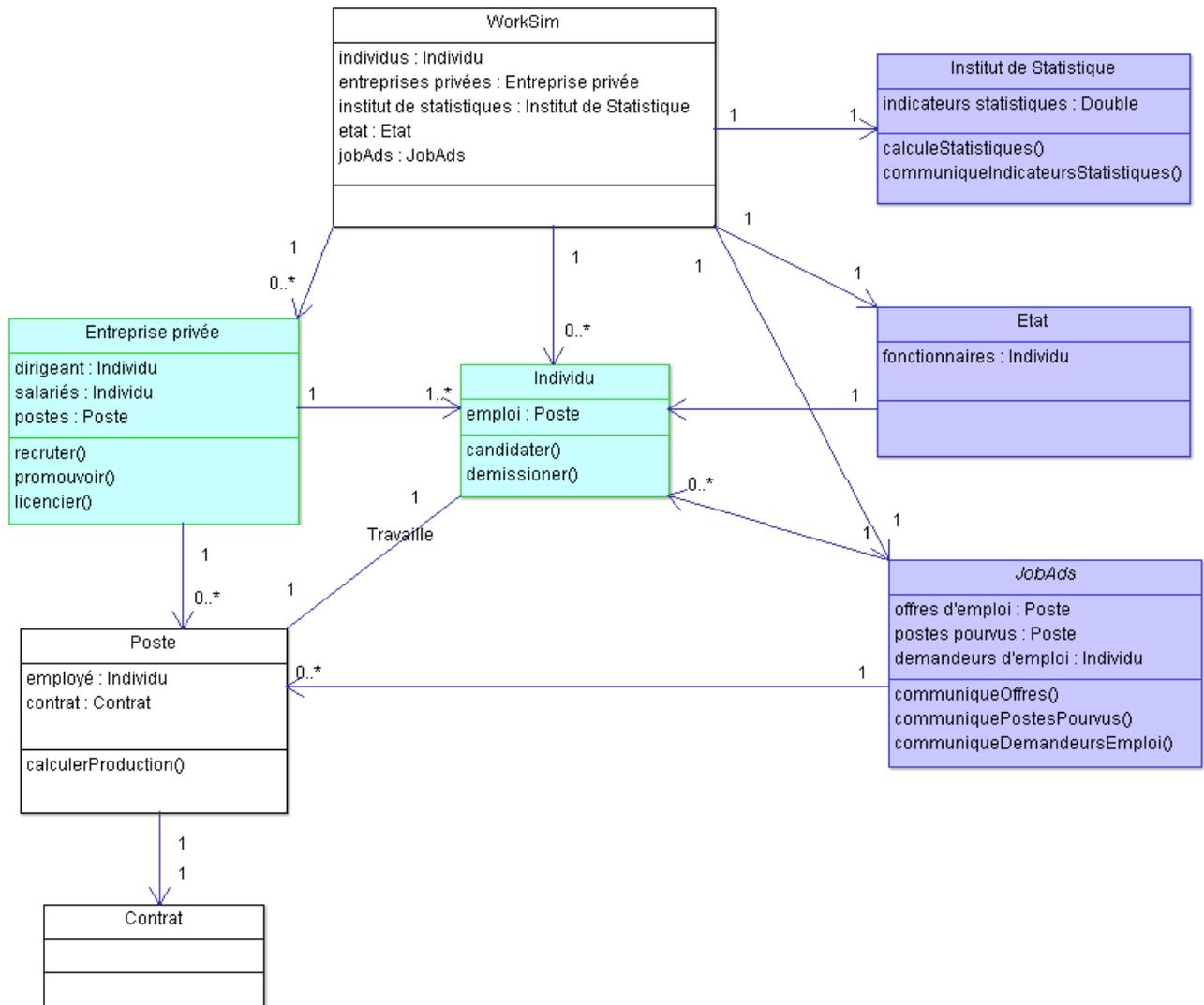


FIGURE 3.1 – Diagramme de classe du modèle WorkSim

Comme on peut le voir sur ce diagramme, les concepts d'*employé*, de *poste* et de *contrat* sont clairement dissociés dans le modèle WorkSim. Ils sont implémentés avec des objets distincts. Pour ne pas alourdir le diagramme, les classes des agents "individu" et "entreprise privée" ne sont volontairement pas détaillées. Il s'agit ici uniquement de préciser les relations

entre les principales classes du modèle.

3.1.2 Architecture des agents du modèle

3.1.3 Les agents "individu"

Pour la modélisation des individus, nous reprenons l'architecture modulaire proposée par (Lewkowicz, 2010). Les agents individus sont caractérisés par des attributs et des méthodes communes à tous les agents individus définis dans la section 2.3.1, comme un genre, un âge ou une préférence pour le temps libre. Le modèle cognitif de l'individu est implémenté avec une *machine à état* (cf. section 2.5.1). L'idée est que chaque individu dispose d'un module de perception, de comportement et de décision qui diffère suivant l'état dans lequel il se trouve sur le marché du travail.

L'implémentation des états dans WorkSim est réalisée selon une structure hiérarchique qui présente les avantages suivant :

- elle permet de factoriser le code. Les méthodes communes entre différents états sont implémentées une unique fois.
- elle permet une extension facile du code en ajoutant de nouveaux états.
- elle permet de faciliter la collecte des données statistiques. Avec cette hiérarchie, il devient en effet facile de recenser les individus par groupes d'agents, avec un emploi ou sans emploi, ou bien de descendre au niveau de sous-catégories d'agents, par exemple les catégories d'inactif ou de chômeur.

Le diagramme de classe représentant les états possibles pour un individu est présenté sur la figure 3.2.

Tous les états héritent d'une classe abstraite *Etat*. Les états *Employé du secteur privé PAE* (employé qui n'est pas à la recherche d'un autre emploi) et d'*Employé du secteur privé PARAE* (employé à la recherche d'un autre emploi), *Dirigeant* et *Fonctionnaire* héritent d'une même classe abstraite *EnEmploi*. Ces individus en emploi héritent d'une méthode commune qui permet l'augmentation de leurs capitaux humains, car ils cumulent de l'expérience lorsqu'ils travaillent.

Les états d'*Inactif* et de *Chômeur* héritent d'une même classe *SansEmploi*. Ils héritent d'une méthode commune qui permet la diminution de leurs capitaux humains car ils ne travaillent pas et donc perdent du capital humain par effet d'oubli de leurs connaissances (cf. section 2.3.1.2).

A chacun de ces états *Inactif*, *Chômeur*, *Employé du secteur privé (PAE)* et *Employé du secteur privé PARAE* sont affectés des modules décisionnels qui sont chaque fois spécifiques et qui ont été détaillés dans la section 2.6.5 du chapitre précédent. Ces décisions concernent les changements d'état de l'individu.

A chacun de ces états est affecté aussi un module de comportement :

- les agents *Chômeur* et *Employé du secteur privé PARAE* ont un même comportement de recherche d'emploi modélisé avec la classe *ComportementRecherche* (cf. section 2.6.5.7).
- les agents dans les états *Inactif* et *Employé du secteur privé (PAE)* ont un même comportement de prospection modélisé avec la classe *ComportementProspection*. Ils reçoivent

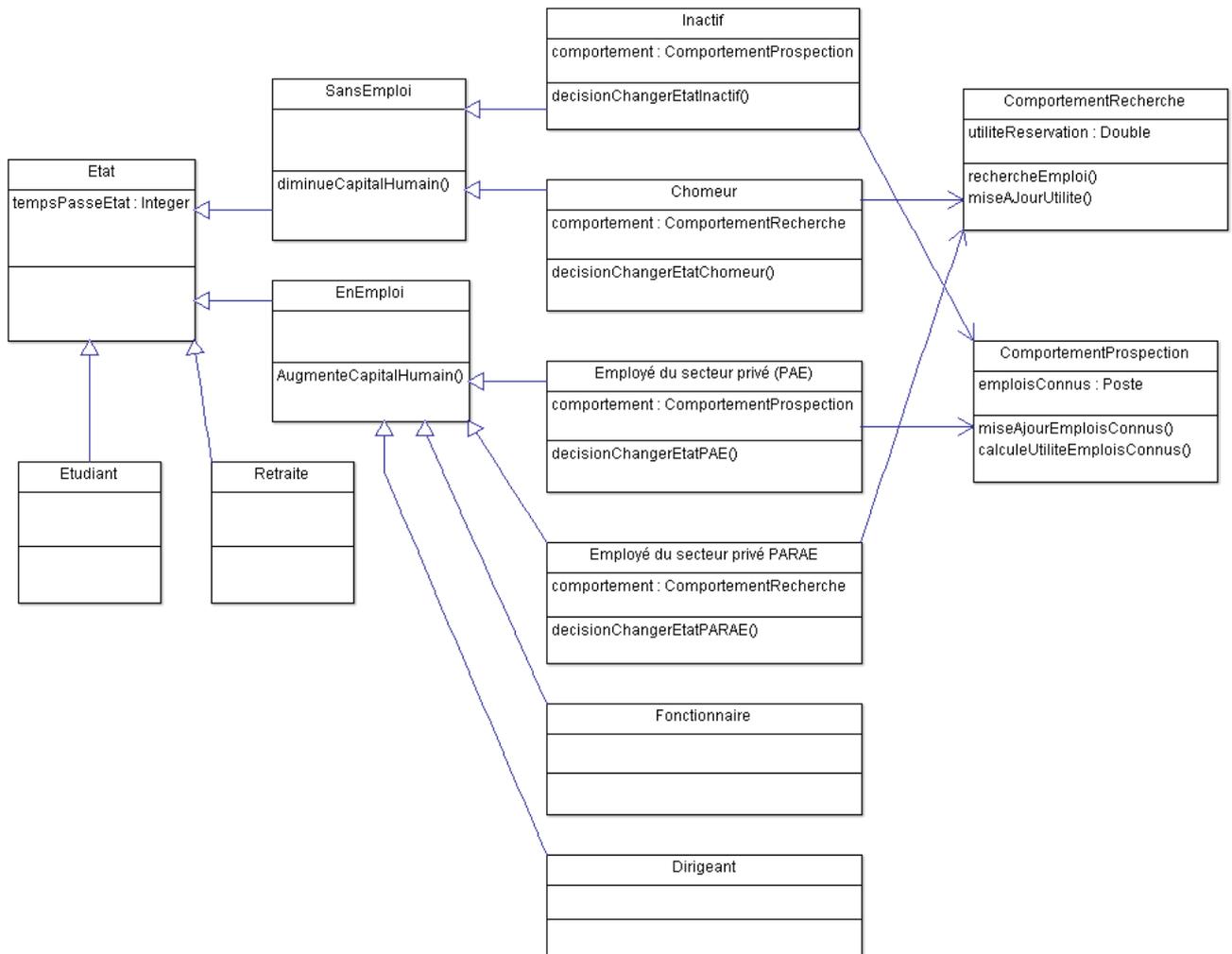


FIGURE 3.2 – Diagramme de classe représentant les états possibles pour un individu

chaque mois et sans coût de recherche des informations concernant des postes du marché du travail qu'ils pourraient potentiellement occuper (cf. section 2.6.5.1). Ces informations permettent à l'individu d'évaluer l'intérêt de commencer la recherche d'un emploi (ou bien d'un autre emploi si l'individu est déjà en poste).

3.1.4 Les agents "entreprise privée"

Les agents "entreprise privée" sont modélisés avec 4 modules distincts : un module de *perception*, un module d'*estimation*, un module d'*anticipation* et un module de *décision*. Les trois modules de *perception*, *estimation* et *anticipation* de la firme sont exécutés au début de chaque période avant le début du cycle des décisions des agents proprement dit.

Le module de *perception* de l'entreprise exécute deux méthodes (cf. section 2.5.2.2) :

- `calculMargeDemande()` : le calcul de la marge de demande

- `miseAJourChercheursEmploi()` : la mise à jour des chercheurs d'emploi connus

Le module d'*estimation* de l'entreprise exécute les trois méthodes suivantes (cf. section 2.5.2.3) :

- `miseAJourDureesCDD()` : la mise à jour des durées apprises des contrats indéterminés
- `miseAJourPostesVacants()` : la mise à jour des durées moyennes des postes vacants
- `miseAJourProbaLic()` : la mise à jour des probabilités et des coûts de licenciement personnel

Le module d'*anticipation* de l'entreprise exécute les deux méthodes suivantes (cf. section 2.5.2.4) :

- `estimeTendance()` : l'estimation de la tendance et de l'aléa de la demande
- `anticipeDemande()` : l'anticipation de la demande

Lors du cycle de la simulation et de la séquence de décisions des agents, le module de *décision* de la firme exécute les méthodes suivantes durant la phase A du cycle :

- `creationNouveauxPostes()` : la création de nouveaux postes et de nouveaux contrats (cf. section 2.6.1)
- `destructionPostesVacants()` : la destruction de postes vacants (cf. section 2.6.2)
- `gestionSalarie()` : la gestion des salariés (cf. section 2.6.3)
- `planLic()` : la mise en place d'un plan éventuel de licenciement (cf. section 2.6.4)

Lors de la phase C du cycle de la simulation (cf. section 2.6.6), le module de *décision* exécute les méthodes suivantes :

- `evalRecrut()` : l'évaluation des recrutements et des promotions
- `miseAJourNormeEmbauche()` : la mise à jour de la norme d'embauche

3.1.5 Diagramme des interactions entre les agents

Lors des phases de recherche d'emploi et de recrutement (cf. sections 2.6.5.7 et 2.6.6), les agents "individu" et "entreprise privée" interagissent. Nous résumons sur la figure 3.3 le diagramme de ces interactions.

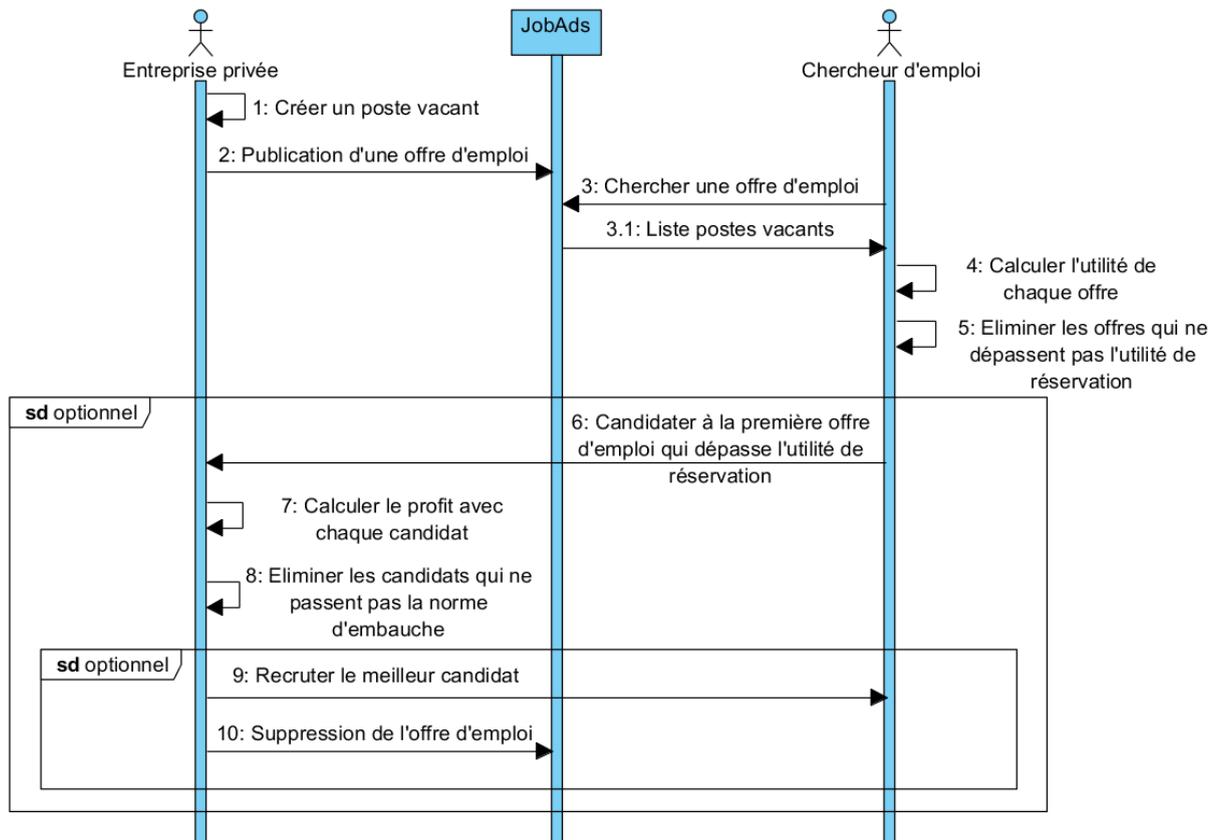


FIGURE 3.3 – Diagramme des interactions entre les entreprises privées et les individus lors de la recherche d’emploi

Certaines étapes de ce diagramme de séquence nécessitent des communications entre les agents. Ces communications sont modélisées avec des envois de message. Nous les identifions dans le tableau 3.1. Nous précisons à chaque fois l’expéditeur et le destinataire.

Communication	Expéditeur	Destinataire
2 : Publication d’une offre d’emploi	Entreprise privée	JobAds
3 : Chercher une offre d’emploi	Chercheur d’emploi	JobAds
3.1 : Envoyer la liste de postes vacants	JobAds	Chercheur d’emploi
6 : Candidater à une offre d’emploi	Chercheur d’emploi	Entreprise privée
9 : Recruter le meilleur candidat	Entreprise privée	Chercheur d’emploi
10 : Suppression de l’offre d’emploi	Entreprise privée	JobAds

TABLE 3.1 – Les communications entre les agents dans WorkSim

3.1.6 La gestion du temps dans WorkSim

La gestion du temps se fait avec des *ticks*. Chaque tick correspond à un cycle complet de la simulation et représente une semaine dans la réalité. Un an dans la réalité correspond donc à une séquence de 52 ticks.

On rappelle qu'à chaque phase du cycle de la simulation les agents effectuent leurs actions dans un ordre retiré aléatoirement à chaque période (cf. section 2.6).

3.1.7 L'aléatoire dans le modèle

De façon à modéliser de la diversité et de la stochasticité dans les comportements des agents dans le déroulement de la simulation, nous introduisons de l'aléatoire. Le générateur de nombres aléatoires que nous utilisons est celui proposé par la classe *Random* de Java. Une instance de cette classe génère un flux de nombres pseudo-aléatoires. Cette classe utilise un noyau de 48 bits, qui est modifié par une formule linéairement congrue.

Deux simulations du modèle WorkSim lancées avec une graine aléatoire identique génèrent exactement les mêmes séquences de comportements des agents dans le modèle. Ceci est très important pour le débogage du programme. En effet, lorsqu'une incohérence dans le déroulement de la simulation est détectée, il est possible de reproduire la séquence erronée en réutilisant la même graine aléatoire.

Par ailleurs, à cause de l'aléatoire présent dans le modèle, les sorties du modèles sont stochastiques. Donc les résultats peuvent varier d'une simulation à l'autre. Pour gommer ces effets stochastiques, nous verrons dans le chapitre suivant qu'il est nécessaire de lancer un grand nombre de simulations avec des graines aléatoires différentes (réplications de la simulation) et d'effectuer une moyenne des sorties obtenues.

Nous présentons dans le tableau 3.2 la liste des méthodes utilisant l'aléatoire dans le modèle lors du déroulement de la simulation.

Classe	Méthode	Description
WorkSim	ordreAleatoireIndividus()	Tirage aléatoire d'un ordre des agents "individu" pour effectuer leurs actions
WorkSim	ordreAleatoireFirmes()	Tirage aléatoire d'un ordre des agents "entreprise privée" pour effectuer leurs actions
Individu	miseAJourFacteurForme()	Mise à jour du facteur de condition de l'individu $cond_{i,t}$ (cf. équation 2.4)
Firme	miseAJourFacteurTendanceAlea()	Mise à jour tous les ans des facteurs de tendance et d'aléa de la part de marché de l'entreprise (cf. eq. 2.12 et 2.13).
Firme	miseAJourPartDeMarche()	Mise à jour de la variable part de marché de l'entreprise (cf. eq. 2.11).
Firme	probaFauteGrave()	Tirage aléatoire pour savoir si un individu a fait une faute grave (cf. section 2.6.3).
Firme	ordreAleatoireEmploye()	Tirage d'un ordre aléatoire des employés de l'entreprise pour les évaluer lors d'un plan de licenciement économique (cf. section 2.6.4).
Firme	initNouvelEmploi()	Tirage aléatoire des caractéristiques d'un nouvel emploi à créer (cf. section 2.3.3.1).
Job	calculeIncertitudeProduction()	Évaluation du niveau d'incertitude sur la production de l'employé (cf. eq. 2.42).
JobAds	rechercheEmploisVacants()	Méthode pour tirer aux hasard des offres d'emploi à communiquer aux chercheurs d'emploi.
JobAds	rechercheEmploisPourvus()	Méthode pour tirer aux hasard des emplois pourvus à communiquer aux individus pour évaluer l'intérêt de commencer une recherche d'emplois
JobAds	calculeNombreOffresChomeurs()	Calcul du nombre d'offres communiquées à un chômeur (cf. section 2.6.5.7)
JobAds	calculeNombreOffresPARAE()	Calcul du nombre d'offres communiquées à un PARAE (cf. section 2.6.5.7)
ModuleDemographique	creerNouvelIndividu()	Détermination des nouveaux attributs d'un individu qui entre dans la simulation (noyau de productivité, préférence de base pour le temps libre, etc...)
ModuleDemographique	choixMenage()	Ajout du nouvel agent dans un ménage tiré aléatoirement

TABLE 3.2 – Les classes avec des méthodes qui font appel au générateur de nombres aléatoires

3.2 Lancement des simulations

Pour le lancement des simulations deux modes sont possibles. Un mode *batch* et un mode avec l'interface graphique.

3.2.1 Lancement en mode *batch*

Nous avons créé une classe *SimulationWorkSim* qui a comme attribut la classe *WorkSim* et qui étend la classe *Thread* de Java. Pour lancer en parallèle des simulations, nous créons un nombre de *threads* correspondant au nombre de processeurs disponibles de l'ordinateur. Ces simulations sont lancées avec la méthode *start()* (qui hérite de la classe *Thread*) à chaque fois avec une graine aléatoire différente. Nous utilisons ensuite la méthode *join()* pour attendre que toutes les simulations lancées en parallèle soient terminées avant de calculer des moyennes des sorties obtenues pour l'ensemble des simulations.

Nous avons déployé le lancement de ces simulations sur le serveur de calcul du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6) qui permet de lancer des tâches sur 48 processeurs simultanément.

3.2.2 Interface graphique

La conception de l'interface graphique réutilise le template du modèle Jamel (Seppecher, 2011). Cette interface graphique permet d'observer l'évolution des sorties de la simulation suivant un grand nombre d'indicateurs en temps réel (cf. figure 3.4). Il y a quatre boutons qui permettent à l'utilisateur de faire évoluer la simulation : *Launch*, *Step*, *Pause*, *Restart*.

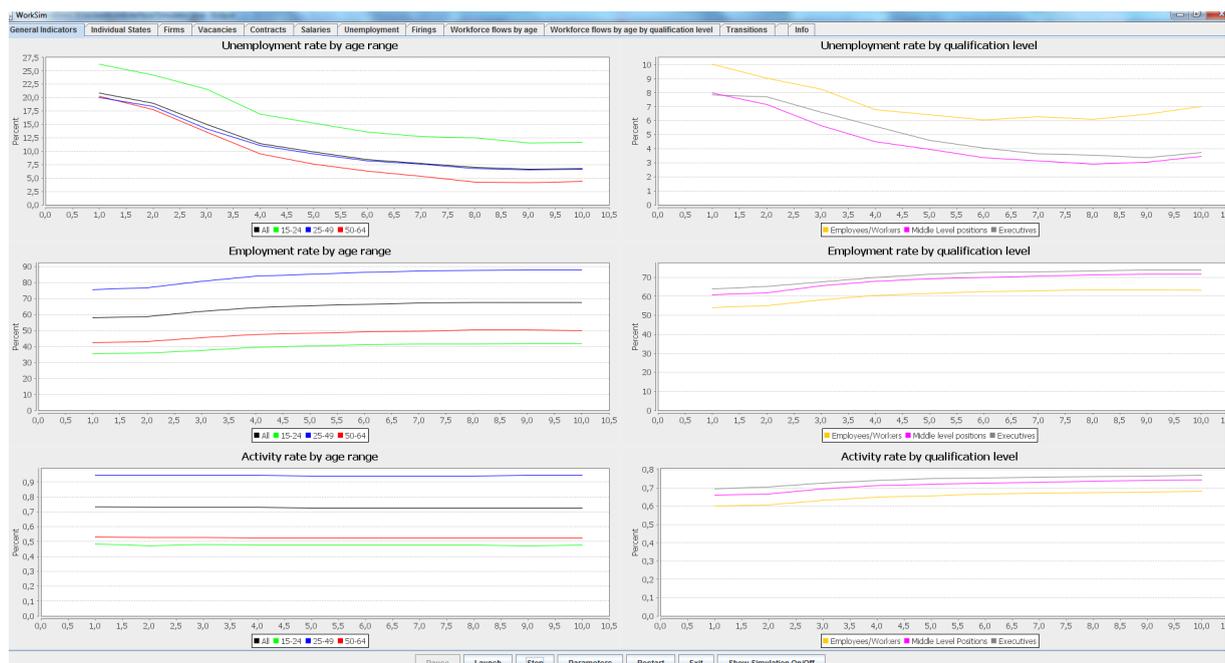


FIGURE 3.4 – Interface graphique du modèle WorkSim

Il y a 10 onglets qui permettent d'obtenir des statistiques sur différents types d'indicateurs :

- un onglet avec les indicateurs généraux (taux de chômage, taux d'activité et taux d'emploi par âge et par niveau de qualification)

- un onglet avec des indicateurs sur la répartition des états des agents individus sur le marché du travail
- un onglet sur les firmes avec leur répartition par taille, leurs coûts et bénéfices
- un onglets avec des données statistiques sur les emplois vacants
- un onglet avec des données statistiques sur les contrats
- un onglet sur la distribution des salaires et des minima sociaux
- un onglet sur les licenciements
- un onglet sur les mouvements de main d'œuvre sur le marché du travail par âge
- un onglet sur les mouvements de main d'œuvre sur le marché du travail par niveau de qualification
- un onglet sur les flux de transition entre les états en temps réel

Il y a enfin un dernier onglet qui permet de visualiser les agents du modèle "individu" et "entreprise privée" (cf. figure 3.5). Lorsque l'on clique sur un agent, on a accès à une vue plus détaillée sur ses variables internes et sur ses comportements.

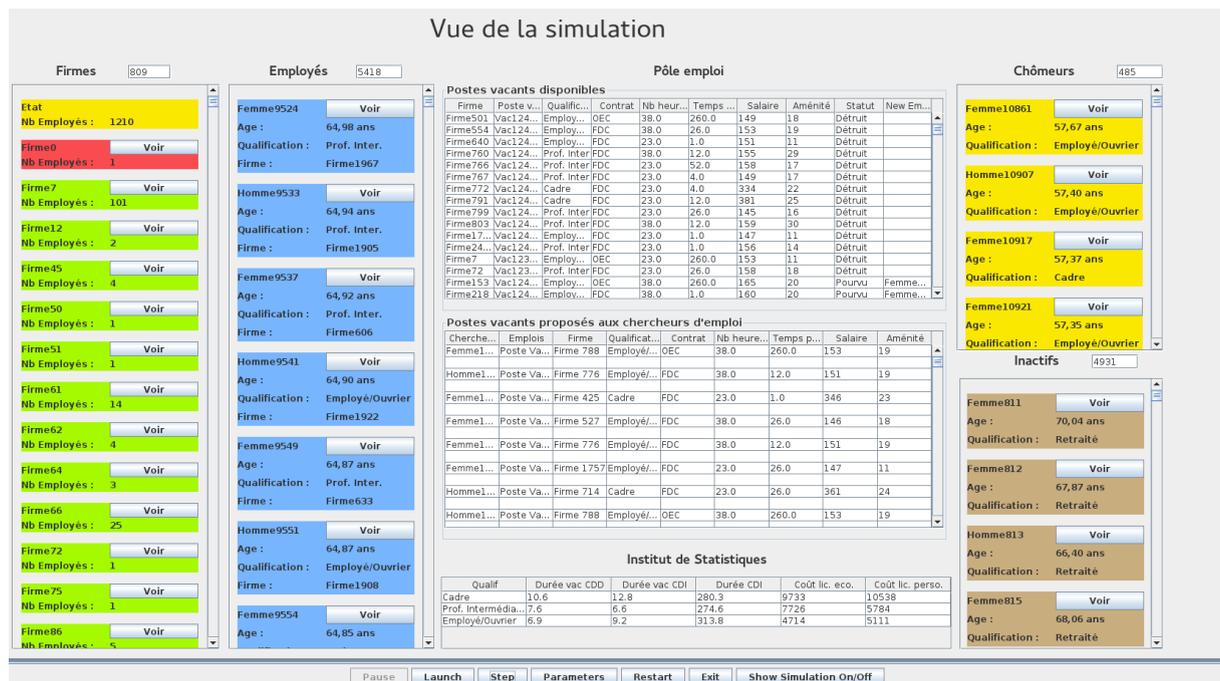


FIGURE 3.5 – Visualisation des agents du modèle

Lors de ce mode, chaque agent du modèle génère en plus un *fichier de log* spécifique qui permet de retracer pas à pas l'ensemble de ses états et de ses actions effectuées au cours de la simulation. Ce fichier est très utile pour le débogage et la mise au point du modèle. Il permet de vérifier que les agents ont des comportements cohérents au niveau microscopique.

3.3 Bilan

Nous avons présenté dans ce chapitre la plateforme de simulation multi-agent du modèle WorkSim. Cette plateforme est implémentée suivant le paradigme de développement objet avec le langage Java. Nous avons présenté l'architecture des agents "individu" et "entreprise privée" et le diagramme de séquence de leurs interactions. Un outil de visualisation de la simulation est proposé. Il permet de visualiser les sorties du modèle tant au niveau des variables agrégées qu'au niveau des comportements microscopiques des agents.

Nous présentons dans le chapitre suivant comment le modèle WorkSim peut être appliqué au marché du travail français.

Chapitre 4

Initialisation et calibration du modèle

Nous souhaitons appliquer le modèle WorkSim pour étudier le marché du travail français en 2011. Nous choisissons de travailler sur l'année 2011, car c'est l'année la plus récente pour laquelle nous disposons d'un grand nombre de données statistiques.

Nous présentons tout d'abord la méthode de mise à l'échelle du marché du travail et la procédure d'initialisation des agents. Nous détaillerons ensuite le processus de calibration mis en œuvre pour déterminer l'ensemble des paramètres du modèle et confronter les données de la simulation aux données réelles.

4.1 Mise à l'échelle du modèle et initialisation des agents

Dans cette section, nous exposons le processus de mise à l'échelle des entreprises et des individus de la population française pour l'année 2011.

4.1.1 Mise à l'échelle des entreprises

En 2011, la répartition des entreprises du secteur privé selon le nombre de salariés est la suivante d'après l'INSEE (INSEE, 2011d) :

Nombre d'entreprises	2 326 128	986 091	165 828	26 054	4 854	2 058	498
Nombre de salariés	0	1 à 9	10 à 49	50 à 199	200 à 499	500 à 1999	2 000 ou plus

TABLE 4.1 – Entreprises selon le nombre de salariés en 2011

Afin de travailler avec un nombre total d'agents de l'ordre de 10000 nous choisissons d'effectuer une mise à l'échelle de ces nombres d'entreprises. Nous ne pouvons pas conserver plus d'agents pour des raisons de temps de calcul. Il ne faut pas qu'une simulation prenne trop de temps pour la phase de calibration du modèle que nous exposerons par la suite (cf. section 4.2).

Le facteur de mise à l'échelle retenu est de 1/4700 pour le nombre d'entreprises par catégorie. Les entreprises de plus de 500 salariés ne sont pas conservées dans ce passage à

l'échelle¹.

Nous obtenons la mise à l'échelle suivante :

Nombre d'entreprises	495	210	35	6	1	0	0
Nombre de salariés	0	1 à 9	10 à 49	50 à 199	200 à 499	500 à 1999	2 000 ou plus

TABLE 4.2 – Entreprises selon le nombre de salariés en 2011

Les 495 entreprises avec 0 salarié représentent les entreprises individuelles (un agent dirigeant et producteur, aucun salarié), qui sont susceptibles de croître en embauchant des salariés par la suite.

4.1.2 Mise à l'échelle des individus

Nous calculons un nombre de postes total lors de la phase d'initialisation des entreprises, ce qui permet d'ajuster le nombre d'individus salariés initial dans le modèle. Au total, nous obtenons 808 entreprises avec en tout 4411 individus dans ces firmes privées. A ces agents travaillant dans le secteur privé, il faut ajouter les fonctionnaires. En 2011, la part des emplois publics dans l'emploi total est de 21,3% d'après l'INSEE (INSEE, 2013b). Nous ajoutons donc 1194 fonctionnaires dans la simulation, ce qui fait un total d'employés de 5605. Nous ajoutons ensuite des nombres d'agents "inactifs", "chômeurs", "retraités" et "étudiants" correspondant aux statistiques de l'année 2011 (INSEE, 2011). Au final, nous obtenons en tout 8 713 agents "individu". Ces individus correspondent à une mise à l'échelle des 40,79 millions d'individus de la population française en 2011 de la tranche d'âge 15-64 ans, ce qui fait un facteur de réduction de 1 pour 4682 ce qui correspond bien au facteur de réduction de 1 pour 4700 des firmes.

Au final, nous obtenons en tout 8 713 agents "individu" et 808 agents "entreprise privée", soit 9 521 agents dans la simulation.

4.1.3 Initialisation des agents

Les agents "individu" et "entreprise privée" sont caractérisés par des attributs et des variables internes (cf. section 2.3.1) qu'il est nécessaire d'initialiser en début de simulation.

4.1.3.1 Les individus

Pour les individus, un genre est tiré aléatoirement suivant la répartition par genre de l'année 2011 (INSEE, 2011h). Il y a 49.5% d'hommes et 50.5% de femmes dans la tranche d'âge 15-64 ans. Un niveau de qualification est tiré aléatoirement suivant la répartition des niveaux de qualification par tranche d'âge 15-24 ans, 25-49 ans et 50-64 ans (INSEE, 2011a).

1. Ceci peut entraîner un biais sur le nombre de promotions mais ce nombre est calibré comme nous le verrons par la suite. Par ailleurs ces mécanismes de promotion ne sont pas au cœur du modèle.

	15-24 ans	25-49 ans	50-64 ans
Employés/Ouvriers	62.7%	51.1%	53.0%
Professions intermédiaires	25.6%	27.9%	25.2%
Cadres	11.7%	21%	21.8%

TABLE 4.3 – Répartition par âge et par niveau de qualification

Pour les individus en emploi, un niveau de capital humain général $HC_{i,0}^{gen}$ et un niveau de capital humain dans la qualification $HC_{i,q,0}^{occ}$ sont tirés aléatoirement suivant le temps passé par l'individu depuis son entrée sur le marché du travail à l'âge de 15 ans, suivant une loi uniforme dans l'intervalle $[\frac{age_i-15}{2}, age_i - 15]$, avec age_i l'âge de l'individu.

4.1.3.2 Les firmes

Un calcul du niveau de production globale $Q_{j,q,0}^{eff}$ à $t = 0$ de chaque entreprise est effectué comme dans la section 2.3.2.2. Il correspond à la somme de la production de tous les postes de l'entreprise. Nous calculons ensuite un niveau de demande initiale pour chaque firme égal à ce niveau de production auquel nous ajoutons une part de demande supplémentaire $InitV$ pour créer les premiers postes vacants, donc $D_{j,0} = Q_{j,q,0}^{eff} \times (1 + InitV)$. Cette demande allouée à chaque entreprise permet d'en déduire la demande totale dans le modèle $D_{tot} = \sum_{j=1}^N D_{j,0}$. Cette demande sera constante pendant toute la simulation. C'est seulement la répartition de cette demande entre les firmes qui pourra varier dans le temps (cf. section 2.3.2.2). Parmi les individus en emploi dans l'entreprise, nous affectons un contrat CDD ou CDI par tirage aléatoire suivant la répartition de l'année 2011 pour chaque tranche d'âge 15-24 ans, 25-49 ans et 50-64 ans, d'après (INSEE, 2011j). Nous assimilons les contrats d'apprentis et d'intérimaires à des CDD.

	15-24 ans	25-49 ans	50-64 ans
Part de CDD parmi les salariés	51.6%	11.0%	6.5%
Part de CDI parmi les salariés	48.4%	89.0%	93.5%

TABLE 4.4 – Répartition des contrats par âge

4.1.3.3 Créations des ménages

Dans WorkSim, nous avons 3 états possibles dans les ménages pour les agents individus de la simulation : *enfant dans un ménage*, *adulte célibataire* (avec ou sans enfants) et *adulte d'un couple* (avec ou sans enfants).

Nous répartissons les individus suivant ces 3 états dans les ménages et par tranche d'âge de 5 ans suivant les données de (INSEE, 2011g). Pour les individus dans les états *adulte d'un couple* nous créons des ménages composés d'un homme et d'une femme du même niveau de qualification et de la même tranche d'âge. Les individus dans l'état *enfant dans un ménage* sont affectés aléatoirement dans des ménages formés d'un couple dont la mère a un âge compris dans l'intervalle $[age_i + 20, age_i + 40]$ avec age_i l'âge de l'individu.

D'après (INSEE, 2011g), nous calculons le nombre d'enfants de moins de 15 ans. Pour chacun

de ces enfants de moins de 15 ans, nous calculons un âge age_i dans l'intervalle $[0,15]$ et nous l'affectons à un ménage formé d'un couple dont la mère a un âge compris dans l'intervalle $[age_i + 20, age_i + 40]$. Cet enfant n'est pas un agent à part entière dans la simulation, mais il entre en compte dans le calcul de la préférence pour le temps libre de la mère.

4.2 Calibration du modèle

Un enjeu important pour notre étude est de déterminer l'ensemble des paramètres du modèle. Une fois ces paramètres déterminés, nous tenterons de confronter les résultats de nos simulations avec des données réelles pour valider le modèle.

Deux principales approches ont été mises en œuvre dans la littérature pour déterminer ces paramètres.

- la première approche consiste à utiliser des estimations directes des paramètres, si des données microéconomiques ou des études documentées sont disponibles sur les comportements des agents. Dans le cas de la simulation sociale, il est aussi possible de réaliser des enquêtes sur le terrain, ou bien des simulations participatives (Guyot et Honiden, 2006).

Cette approche pose cependant de nombreux problèmes. Tout d'abord, il est difficile d'avoir accès à suffisamment de données microéconomiques fiables sur les comportements. De plus, même en supposant que tous les paramètres du modèle puissent être estimés à partir de données microéconomiques, il y a peu de chance *a priori* que les résultats agrégés obtenus avec la simulation coïncident avec les données agrégées du système réel, car il est impossible de reproduire l'intégralité des comportements et des interactions existant dans la réalité (par définition d'un système complexe).

- la deuxième approche consiste à estimer indirectement les paramètres de la simulation en minimisant la distance entre certains moments simulés (qui dépendent de ces paramètres) avec leurs équivalents empiriques. Dans la littérature des simulations multi-agents, ce sont principalement des moments du premier ordre (des moyennes) qui sont utilisés pour cette estimation².

Nous appliquerons une méthode qui combine ces deux approches comme dans l'étude de (Barlet *et al.*, 2009) : certains paramètres seront déterminés directement à partir d'études économiques ou bien en choisissant des ordres de grandeur raisonnables, d'autres seront déterminés par estimation indirecte avec la méthode des moments. Nous utiliserons seulement des moments du premier ordre, comme des cibles sur les taux de chômage moyen dans l'économie. Nous n'avons pas accès des moments d'ordre supérieur, comme la variance du taux de chômage.

2. D'autres moments, du second ordre (variance), du troisième ordre (skewness) et du quatrième ordre (kurtosis) ont toutefois été considérés, dans l'étude de (Grazzini et Richiardi, 2015) par exemple. Les auteurs calibrent un modèle de marché financier sur la moyenne, la variance, le skewness et le kurtosis, du prix d'une action.

4.2.1 Les objectifs de la calibration

Pour calibrer le modèle, il est tout d'abord nécessaire de définir les objectifs de la calibration, qui correspondent aux attentes que l'on a de notre modèle.

Pour simuler le marché du travail français sur l'année 2011, nous retenons deux objectifs de calibrage :

1. Reproduire le plus possible de caractéristiques jugées importantes du marché du travail de cette année : taux de chômage par catégorie d'âge, par catégories socioprofessionnelles, niveaux des salaires, anciennetés dans le chômage...
2. Reproduire des flux du marché du travail pour obtenir une dynamique interne du marché du travail la plus réaliste possible : taux d'entrée et de sortie de l'emploi par type de contrat CDD ou CDI, taux de démission, taux de licenciement...

Nous avons choisi 63 cibles principales regroupées en 10 catégories différentes :

- 7 cibles de taux de chômage en 2011 (INSEE, 2011l) : taux de chômage global, par tranche d'âge (15-24, 25-49 et 50-64 ans) et par niveau de qualification (cadres, professions intermédiaires, employés/ouvriers)³
- 6 cibles de taux d'activité en 2011 (INSEE, 2011k) : taux d'activités par tranche d'âge (15-24, 25-49 et 50-64 ans) et par sexe
- 14 cibles sur les salaires (INSEE, 2013a) :
 - montant des salaires mensuels nets (en équivalent temps plein calculé en prenant en compte tous les postes de travail des salariés du secteur privé) par tranche d'âge (15-24, 25-49 et 50-64 ans) et par niveau de qualification.
 - Distribution de l'ensemble des salaires mensuels nets du secteur privé : 1er décile, 1er quartile, médiane, 3ème quartile, 9ème décile
- 12 cibles sur les flux de main-d'œuvre (DARES, 2012) :
 - dont 3 flux d'entrée : le taux d'entrée dans l'emploi⁴, le taux d'entrée en CDD, le taux d'entrée en CDI
 - 3 flux d'entrée par tranche d'âge 15-29 ans, 30-49 ans et 50-64 ans.
 - et 6 flux de sortie de l'emploi : le taux de sortie de l'emploi, le taux de fin de CDD, le taux de démission, le taux de licenciement économique, le taux de licenciement autre qu'économique et le taux de fin de période d'essai
- 4 cibles sur les parts de CDD dans l'emploi total et dans les embauches (Berche *et al.*, 2011)
- 3 cibles sur les proportions de chômeurs de long terme (INSEE, 2011) : proportion de chômeurs au chômage depuis plus d'un an par tranche d'âge (15-24, 25-49 et 50-64 ans)

3. Actuellement le modèle ne différencie pas la structure de qualification entre les genres et nous ne pensons pas pouvoir expliquer la différenciation des taux de chômage uniquement avec la préférence pour le temps libre, qui est influencée chez les femmes par le nombre d'enfants en bas âge. Introduire les phénomènes de discrimination relève d'extensions futures.

4. Nombre d'entrées dans l'emploi sur un an divisé par le nombre moyen d'agents en emploi sur cette période

- 12 cibles sur la répartition des individus par niveau de qualification et par âge et sur les taux de mobilités entre ces niveaux de qualification (Monso, 2006a)⁵
- 5 cibles complémentaires : la part d'employés à temps partiel (INSEE, 2011), le nombre d'emplois vacants en milliers estimé par le rapport du COE 2013 (COE, 2013), le taux d'agents PARAE (Personnes à la Recherche d'un Autre Emploi) dans la simulation (INSEE, 2008), le coût moyen d'une formation spécifique et le coût moyen global d'une formation en euros (Monso, 2006b)⁶

L'ensemble de ces cibles sont présentées avec les résultats de la calibration dans les tableaux 4.5 et 4.6 (voir plus loin).

4.2.1.1 Les paramètres

Parmi les paramètres du modèle certains sont fixés à partir d'études empiriques ou bien fixés de façon à obtenir simplement des ordres de grandeur qui semblent raisonnables. Le tableau de ces paramètres est présenté en annexe F. Nous précisons à chaque fois l'équation du modèle ou bien la section dans lequel le paramètre intervient et la source qui a permis de le déterminer. Dans le cas où nous avons choisi une valeur qui paraît raisonnable sans utiliser de source particulière, nous l'indiquons par le champ "*a priori*".

Les autres paramètres sont des paramètres qui doivent être calibrés. On en compte 60, parmi lesquels la préférence initiale pour le temps libre des individus α_0 ou bien la part sur le salaire que se réserve l'entreprise sur la productivité en valeur de ses salariés ζ . Pour chacun de ces paramètres des plages de valeurs admissibles sont retenues afin d'éviter des comportements des agents non réalistes au niveau micro-économique (cf. les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9 présentés plus bas).

4.2.2 Choix de la méthode de calibration

L'espace des paramètres à explorer est de dimension 60. Il est donc impossible d'explorer cet espace à la main. Nous utilisons une méthode de calibration automatique, qui consiste à considérer le problème d'estimation indirecte comme un problème d'optimisation multi-objectif sous contrainte.

D'un point de vue technique, cette calibration demande beaucoup de ressources de calcul, particulièrement pour calibrer une simulation multi-agent (Sharma *et al.*, 2006; Schmitt C, 2014), pour les raisons suivantes :

- l'espace des paramètres est gigantesque et le nombre de cibles est important donc le problème d'optimisation est très complexe. Il n'est pas possible de déterminer chaque paramètre séparément, car tous les processus du modèles sont interdépendants.

5. Pour les mobilités on se base sur une enquête de 2003, mais la suivante ne sera pas disponible avant 2016. L'idée ici est de simplement reproduire des ordres de grandeur qui correspondent aux données de l'enquête avec environ 2% de mobilité ascendante par an (passage par exemple du niveau de cadre à professions intermédiaires) que l'on répartit en 1% de promotions internes et 1% de promotions externes. Par ailleurs, il y a environ 1% de mobilités descendantes par an.

6. On a tâché là aussi de reproduire des ordres de grandeur des coûts de formation à partir des données sur les nombres d'heures de formation au moment de l'entrée dans un emploi et le coût approximatif d'une heure de formation

- chaque évaluation d'un jeu de paramètre nécessite de lancer une simulation complète de façon à obtenir les sorties. Dans WorkSim, il y a de l'ordre de 10 000 agents cognitifs et la simulation est lancée sur 104 périodes. Une simulation prend environ 5min lorsqu'elle est lancée sur un ordinateur avec un processeur 3.6GHz et 16 Go de RAM.
- notre modèle est stochastique, donc pour un même jeu de paramètre les sorties de la simulation peuvent varier. Il est nécessaire de lancer un grand nombre de répliques de la simulation, à chaque fois avec une graine aléatoire différente⁷, et d'effectuer une moyenne des sorties obtenues pour chaque simulation.

Deux méthodes principalement ont été utilisées dans la littérature pour résoudre ce problème de calibration d'un modèle multi-agent :

- une méthode basée sur Pareto par exemple dans (Narzisi *et al.*, 2006; Schmitt C, 2014; Read *et al.*, 2013)
- une méthode agrégée par exemple dans (Barlet *et al.*, 2009).

4.2.2.1 La méthode basé sur Pareto

On note $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ le vecteur des n paramètres du problème. On définit un vecteur de fonctions objectifs : $f(p) = (f_1(p), f_2(p), \dots, f_k(p))$, avec f_i les objectifs et k le nombre d'objectifs. Chaque fonction objectif et pour un jeu de paramètre p , $f_i(p)$, est égale à l'écart relatif en valeur absolue entre la cible de calibration T_i et l'estimateur de moyenne de la sortie $SO_i(p)$ pour l'objectif i de la simulation lancée avec le jeu de paramètre p (Dans notre cas $SO_i(p)$ est par exemple le taux de chômage moyen sur le marché du travail calculé avec la simulation pour un jeu de paramètre donné et T_i est la cible du taux de chômage donnée par l'INSEE de 9.2% en 2011) :

$$\forall i \in \llbracket 1, k \rrbracket, f_i(p) = \left| \frac{SO_i(p) - T_i}{T_i} \right| \quad (4.1)$$

Le problème est de minimiser le vecteur $(f_1(p), f_2(p), \dots, f_k(p))$ pour $p \in E$.

Avec cette approche, l'objectif est de trouver les solutions Pareto optimales, c'est-à-dire les solutions qui ne peuvent pas être améliorées sur un de leurs objectifs sans dégrader au moins un des autres objectifs. Une solution p^* de ce problème est appelée Pareto optimale, s'il n'y a pas d'autres solutions qui la dominant. L'ensemble des solutions Pareto optimale est le front de Pareto.

Cette approche est intéressante pour la calibration d'une simulation multi-agent, car elle ne nécessite pas de définir des priorités pour chaque objectif. Elle permet d'explorer la variété des solutions possibles et de comprendre ainsi quelles sont les différents facteurs émergents pour chacune des propriétés du modèle. Cependant cette méthode est très longue à mettre en œuvre en pratique même pour une calibration avec peu de paramètres (par exemple dans (Schmitt C, 2014) il a fallu 500 000 simulations pour explorer un modèle avec 5 paramètres et 3 cibles.

Pour notre modèle avec 63 cibles de calibration et 60 paramètres, le problème devient en

7. La graine aléatoire est le nombre utilisé pour l'initialisation du générateur de nombres pseudo-aléatoires de la simulation

pratique très difficile à résoudre et à représenter. Nous avons donc choisi une méthode agrégée plus rapide à converger.

4.2.2.2 La méthode agrégée

La méthode agrégée consiste à additionner tous les objectifs et à affecter un poids à chaque objectif. La fonction de *fitness* prend la forme suivante :

$$f(p) = \sum_{i=1}^k \omega_i \left(\frac{T_i - SO_i(p)}{T_i} \right)^2 \quad (4.2)$$

Le vecteur de poids $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ est choisi pour accorder à certaines cibles plus d'importance par rapport à d'autres dans la calibration. Pour la calibration du modèle WorkSim, nous avons privilégié les cibles sur les taux de chômage, les taux d'activité et les salaires en les surpondérant dans la fonction de *fitness*. Les poids pour chaque cible sont indiqués dans les tableaux 4.5 et 4.6 (voir plus bas). Le problème est de minimiser la valeur $f(p)$ pour $p \in E$.

Le principe de la calibration d'une simulation avec un algorithme d'optimisation est résumé sur la figure 4.1.

4.2.3 Le choix de l'algorithme d'optimisation

Pour calibrer une simulation multi-agent avec une *fitness* agrégée, différents algorithmes ont été utilisés dans la littérature :

- la première version de WorkSim (Lewkowicz, 2010) a été calibrée avec la méthode du Recuit Simulé
- (Stonedahl et Wilensky, 2011; Calvez *et al.*, 2007) utilisent des algorithmes génétiques
- (Kamali *et al.*, 2013) utilisent l'algorithme PSO (*Particle Swarm Optimization*) qui s'inspire du principe des mouvements d'une nuée d'oiseaux pour explorer l'espace de paramètres

Nous avons choisi de tester un autre algorithme évolutionnaire développé plus récemment, l'algorithme *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES) (Hansen et Ostermeier, 2001) qui est actuellement un des algorithmes les plus performants pour résoudre un problème d'optimisation (Auger et Hansen, 2012).

Le principe de cet algorithme est de tester de façon itérative des nouvelles générations de points dans l'espace des paramètres. Chaque nouvelle génération de points est générée de façon stochastique à partir des points de la génération précédente. La moyenne et la matrice de covariance de la distribution de ces nouveaux points tirés aléatoirement est mise à jour de manière incrémentale de façon à diriger le tirage des nouveaux points dans la direction des meilleurs résultats obtenus lors des générations précédentes.

Une illustration du fonctionnement de l'algorithme est présentée sur la figure 4.2. Nous observons qu'au fur et à mesure que les générations progressent, l'algorithme s'approche de l'optimum global.

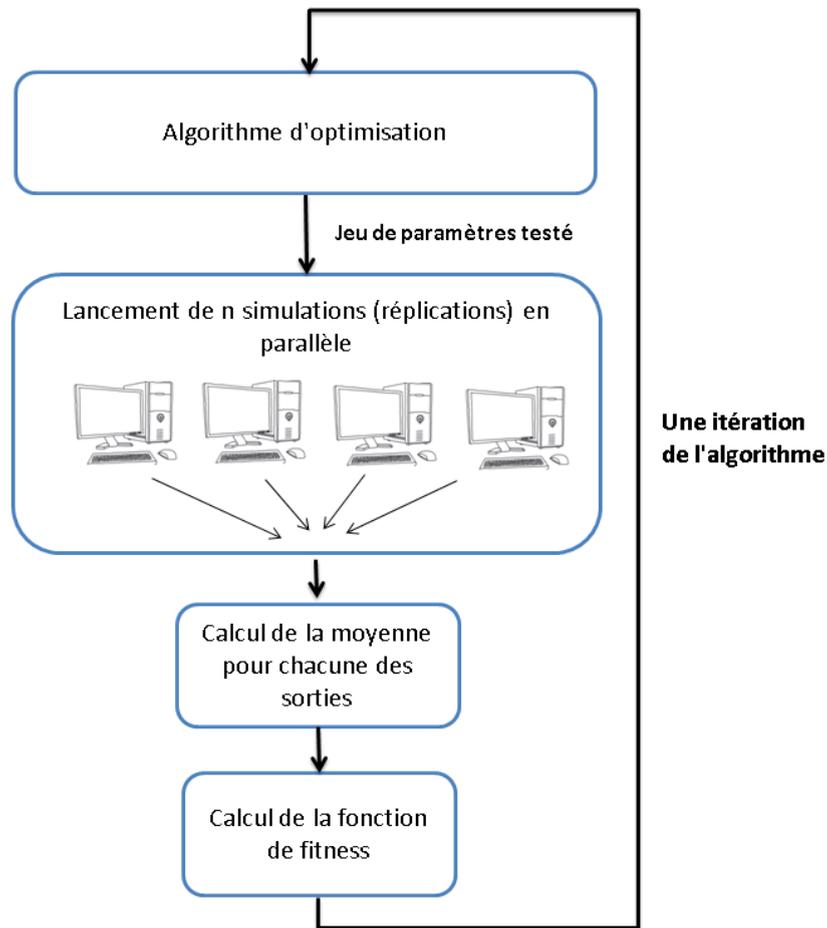


FIGURE 4.1 – Calibration avec un algorithme d'optimisation

Grâce à l'utilisation d'une matrice de covariance adaptée pas à pas, l'algorithme est capable de détecter rapidement les corrélations entre les paramètres, ce qui est un avantage important pour la calibration d'une simulation avec de nombreux paramètres. Un autre avantage de cette stratégie est de s'appuyer sur un mécanisme de classement des solutions obtenues et non pas sur leurs valeurs, ce qui rend l'algorithme plus résistant face aux aléas stochastiques à chaque évaluation de la fonction de *fitness* (Heidrich-Meisner et Igel, 2009).

Nous avons comparé les différents algorithmes sur un modèle multi-agent "jouet" de type proie-prédateur (cf. annexe G) et l'algorithme CMA-ES apparaît comme étant le plus rapide pour trouver une solution satisfaisante. Nous l'avons donc choisi pour calibrer le modèle WorkSim.

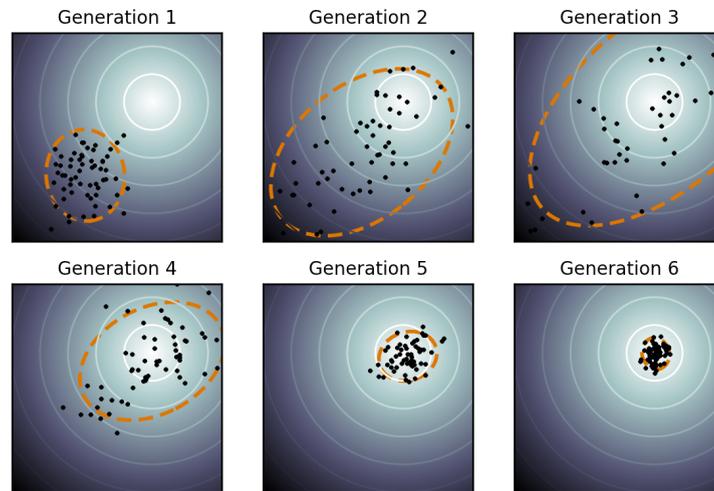


FIGURE 4.2 – Illustration d’une optimisation avec l’algorithme CMA-ES dans un espace de paramètres à deux dimensions. Les zones les plus claires correspondent aux plages de paramètres pour lesquelles la valeur de la fonction de *fitness* est la plus basse

4.2.4 Protocole de calibration

La simulation met environ une centaine de périodes avant de se stabiliser à partir de la première période. Cette instabilité en début de simulation est due au fait qu’il faut un certain temps pour que les agents se réorganisent dans la simulation. Par exemple, les agents avec une préférence pour le temps libre très élevée sont plus susceptibles d’être à terme dans l’état d’inactif, mais un état d’employé a pu leur être affecté au moment de l’initialisation aléatoire (cf. section 4.1.2). Ceux-ci démissionnent donc durant les premières périodes pour changer d’état.

Pour éviter des biais liés à cette phase de stabilisation, nous choisissons d’effectuer une calibration en deux temps :

- tout d’abord nous effectuons une première calibration du modèle en utilisant une fonction de *fitness* calculée avec les sorties de la simulation après 104 périodes (2 ans dans la réalité). Une fois cette calibration terminée, nous effectuons une sauvegarde complète de la simulation après ces 104 périodes. Cette sauvegarde est effectuée avec un processus de sérialisation en format binaire. Elle permet de conserver les états et les variables internes de l’ensemble des agents de la simulation.
- cette sauvegarde du modèle nous sert ensuite de point d’initialisation pour une nouvelle calibration avec la même fonction de *fitness* calculée avec les sorties de la simulation après à nouveau 104 périodes à partir du point de sauvegarde.

Le protocole est résumé sur la figure 4.3.

Les sorties du modèle obtenues pour les cibles de la calibration après cette deuxième calibration sont présentées dans les tableaux 4.5 et 4.6 (voir plus bas). Les sorties sont des moyennes calculées sur 200 simulations. Les valeurs des paramètres calibrés sont présentés dans les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9 (voir plus bas).

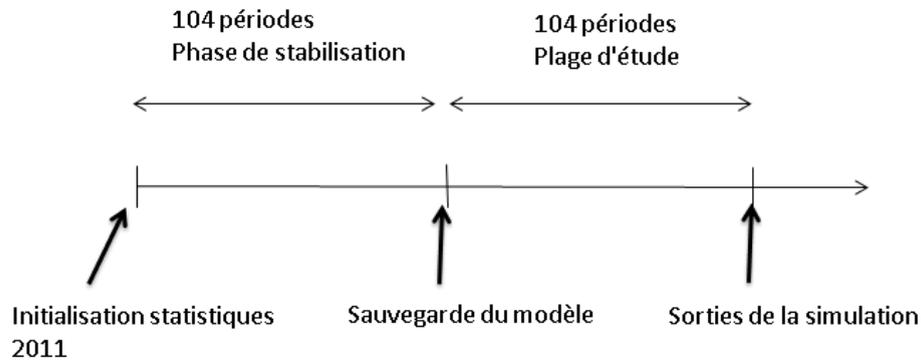


FIGURE 4.3 – Phase de stabilisation et sauvegarde du modèle

Cette méthode de calibration en deux temps avec sauvegarde du modèle présente plusieurs avantages par rapport à une unique calibration avec une fonction de *fitness* calculée après 208 périodes à partir de 0 :

- elle permet de garantir que la simulation est stable sur la plage d'étude de 104 à 208 périodes. Nous mesurons les écarts relatifs absolus maximaux sur cette plage pour chacune des sorties de la simulation correspondant aux 63 cibles de la calibration. La médiane de ces écarts est de 4.2%.
- elle permet d'économiser des ressources de calcul, car cette sauvegarde du modèle après 104 périodes sera notre point de départ pour les analyses de variantes du modèle présentées dans les chapitre 5 et 6, sans avoir besoin de simuler à chaque fois la phase de stabilisation de 0 à 104 périodes.

Pendant le processus de calibration la fonction de *fitness* est calculée à partir de moyenne sur 48 simulations lancées à chaque fois avec une graine aléatoire différente. Nous avons utilisé le serveur de calcul du Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (LIP6) et nous avons parallélisé le lancement des simulations, de façon à pouvoir lancer jusqu'à 48 simulations simultanément (en fonction du nombre de processeurs disponibles). Nous arrêtons l'algorithme quand la fonction de *fitness* ne s'améliore plus pendant 500 itérations (500 jeux de paramètres testés).

Le processus de calibration prend environ une semaine sur le serveur de calcul. Il y a besoin d'environ 2000 itérations, ce qui correspond à environ 100 000 simulations car chaque jeu de paramètres testé nécessite de lancer 48 réplifications de la simulation. Chaque simulation prend 5 min sur un ordinateur avec un processeur de 3.6GHz et 16 Go de RAM.

4.2.5 Résultats de la calibration

Les résultats de la calibration sont présentés dans les tableaux 4.5 et 4.6 ci-dessous.

Description	Source	Poids	Valeur cible	Valeur calibrée	Écart relatif absolu
Taux de chômage global	INSEE	10	9.2	9.79	6.4%
Taux de chômage 15-24 ans	INSEE	5	22.0	20.8	5.5%
Taux de chômage 25-49 ans	INSEE	5	8.4	8.4	0.0%
Taux de chômage 50-64 ans	INSEE	5	6.3	6.9	9.5%
Taux de chômage E/O (Employés/Ouvriers)	INSEE	5	11.35	10.82	4.7%
Taux de chômage PI (Professions intermédiaires)	INSEE	5	5.0	6.8	36.0%
Taux de chômage Cadres	INSEE	5	3.8	4.7	23.7%
Taux d'activité hommes 15-24 ans	INSEE	5	41.3	39.1	5.3%
Taux d'activité hommes 25-49 ans	INSEE	5	94.4	95.3	0.95%
Taux d'activité hommes 50-64 ans	INSEE	5	61.9	58.9	4.8%
Taux d'activité femmes 15-24 ans	INSEE	5	35.5	34.5	2.8%
Taux d'activité femmes 25-49 ans	INSEE	5	83.6	83.5	0.11%
Taux d'activité femmes 50-64 ans	INSEE	5	54.6	49.5	9.3%
Salaires mensuels E/O 15-24 ans	INSEE	2	1336	1158	13.3%
Salaires mensuels E/O 25-49 ans	INSEE	2	1624	1416	12.8%
Salaires mensuels E/O 50-64 ans	INSEE	2	1724	1904	10.4%
Salaires mensuels PI 15-24 ans	INSEE	2	1603	1200	25.1%
Salaires mensuels PI 25-49 ans	INSEE	2	2143	1835	14.3%
Salaires mensuels PI 50-64 ans	INSEE	2	2496	2822	13.1%
Salaires mensuels Cadres 15-24 ans	INSEE	2	2079	1363	34.4%
Salaires mensuels Cadres 25-49 ans	INSEE	2	3558	2935	17.5%
Salaires mensuels Cadres 50-64 ans	INSEE	2	4485	4782	6.6%
Salaires mensuels 1er décile	INSEE	2	1201	1072	10.7%
Salaires mensuels 1er quartile	INSEE	2	1412	1223	13.4%
Salaires mensuels médiane	INSEE	2	1773	1608	9.3%
Salaires mensuels 3ème quartile	INSEE	2	2380	2416	1.5%
Salaires mensuels 9ème décile	INSEE	2	3349	3554	6.1%
Taux d'entrée	DMMO	2	51.0	46.1	9.6%
Taux d'entrée en CDD	DMMO	5	40.0	36.9	7.8%
Taux d'entrée en CDI	DMMO	5	11.1	9.2	17.1%
Taux d'entrée moins de 30 ans	DMMO	2	115	88.2	23.3%
Taux d'entrée 30-49 ans	DMMO	2	36.6	35.6	2.7%
Taux d'entrée plus de 50 ans	DMMO	2	23.7	30.1	27.0%
Taux de sortie	DMMO	2	49.4	43.7	11.5%
Taux de fin de mission CDD	DMMO	2	35.2	29.4	16.5%
Taux de démission	DMMO	2	6.5	5.5	15.4%
Taux de licenciement économique	DMMO	2	0.5	0.47	6.0%
Taux de licenciement non éco.	DMMO	2	3.2	3.0	6.3%
Taux de fin de période d'essai	DMMO	2	2.0	2.3	15.0%

TABLE 4.5 – Les résultats de la calibration

Description	Source	Poids	Valeur cible	Valeur calibrée	Écart relatif
Part de chômeurs au chômage depuis moins d'un an 15-24 ans	INSEE	3	28.4%	26.9%	5.3%
Part de chômeurs au chômage depuis moins d'un an 25-49 ans	INSEE	3	41.9%	35.3%	15.8%
Part de chômeurs au chômage depuis moins d'un an 50-64 ans	INSEE	3	57.8%	49.0%	15.2%
Part de CDD dans l'emploi salarié	INSEE	2	9.9%	10.1%	2.0%
Part de CDD d'une semaine parmi les embauche	ACOSS	2	54.9%	31.4%	42.8%
Part de CDD d'une semaine à 1 mois parmi les embauches	ACOSS	2	21.0%	19.9%	5.2%
Part de CDD d'usage dans l'emploi salarié	ACOSS	2	0.99%	1.2%	21.2%
Part de PARAE parmi les employés	INSEE	1	4.3%	3.0%	30.2%
Part d'emploi à temps partiel	INSEE	1	17.9%	21.0%	17.3%
Coût moyen d'une formation spécifique en euros	Cereq	1	300	75	75%
Coût moyen global d'une formation en euros	INSEE	1	1300	1054	18.9%
Nombre de postes vacants en milliers	COE	2	800	761	4.9%
Part d'E/O parmi les 15-24 ans	INSEE	1	62.7%	62.0%	1.1%
Part de PI parmi les 15-24 ans	INSEE	1	25.6%	26.4%	3.1%
Part de Cadres parmi les 15-24 ans	INSEE	1	11.7%	11.6%	0.85%
Part d'E/O parmi les 25-49 ans	INSEE	1	51.1%	50.6%	1.0%
Part de PI parmi les 25-49 ans	INSEE	1	27.9%	28.3%	1.4%
Part de Cadres parmi les 25-49 ans	INSEE	1	21.0%	21.1%	0.48%
Part d'E/O parmi les 50-64 ans	INSEE	1	53.0%	50.9%	4.0%
Part de PI parmi les 50-64 ans	INSEE	1	25.2%	26.8%	6.3%
Part de Cadres parmi les 50-64 ans	INSEE	1	21.8%	22.3%	2.3%
Taux de promotion interne	INSEE	1	1%	0.7%	30.0%
Taux de promotion externe	INSEE	1	1%	0.44%	56.0%
Taux de déclassement	INSEE	1	1%	0.8%	20.0%

TABLE 4.6 – Les résultats de la calibration

La médiane des écarts relatifs absolus entre les cibles de la calibration et les sorties de la simulation est de 9.6%. Cet écart peut être considéré comme acceptable pour les raisons suivantes :

- Le modèle n'est pas un modèle de microsimulation, qui s'appuient sur de larges bases de données, ni un modèle économétrique. Ces derniers types de modèles sont beaucoup plus précis sur les données mais ne modélisent pas les interactions sur le marché du travail.
- le nombre de cibles est très important et il est très difficile de faire émerger toutes ces cibles simultanément⁸. C'est un problème multi-objectif et la solution que l'on obtient apparaît comme un compromis entre les cibles suivant les pondérations que l'on a

8. A notre connaissance aucun modèle de simulation multi-agent en économie n'est calibré sur autant de cibles

retenues.

Nous observons sur les tableaux 4.5 et 4.6 que la plupart des cibles sont plutôt bien reproduites, avec moins de 20% d'écart relatif par rapport aux cibles. Quand l'écart est plus important, la hiérarchie par âge et par niveau de qualification est au moins respectée. Par exemple, la part des chômeurs au chômage depuis plus d'un an augmente bien avec l'âge.

Il est à noter que les flux sur le marché du travail sont bien reproduits, ce qui est un point important car ils sont au cœur de notre modèle et des analyses de sensibilités que nous effectuerons plus loin. Nous observons cependant une sous-estimation du flux d'entrée pour les jeunes, ce qui peut s'expliquer par le fait que nous ne mesurons pas parfaitement leurs multiples changements d'état entre les études, les petits contrats et l'inactivité. Le taux d'entrée des seniors est lui par contre surestimé, car nous ne modélisons pas directement de phénomènes particuliers de discrimination des seniors à l'embauche. La part des CDD d'une semaine ou moins parmi les embauches est de 35%, ce qui est moins que les 54% observés dans la réalité, mais ce dernier chiffre inclut aussi les contrats de moins d'une semaine que nous ne prenons pas en compte dans WorkSim, car le pas de la simulation est d'une semaine. Bien qu'imprécis ces chiffres sur les entrées en CDD reproduisent bien le fait stylisé que la majorité des embauches se font avec des contrats courts de moins d'un mois sur le marché du travail. La distribution des salaires par niveau de qualification n'est pas parfaitement bien reproduite, car cela demanderait une modélisation beaucoup plus détaillée de chaque marché du travail par niveau de qualification, de la gestion des carrières et des diplômes.

4.2.5.1 Les paramètres calibrés

Les paramètres calibrés sont présentés dans les tableaux 4.7 pour les individus, 4.8 et 4.9 pour les entreprises.

Nous discutons de ces valeurs de paramètres dans les paragraphes suivants. Il est difficile de complètement valider les valeurs des paramètres, car nous ne disposons par d'études sur le terrain pour confronter les valeurs des paramètres avec des données réelles. A ce stade, nous vérifions simplement que les valeurs obtenues induisent des comportements plausibles des agents.

4.2.5.2 Les paramètres calibrés relatifs aux individus

Paramètre	Description	Référence	Plage	Valeur calibrée
α_0	Paramètre de base qui entre dans la détermination de la préférence effective pour le temps libre des individus	eq. 2.2	[0,1]	0.07
α_{old}	Sensibilité de la préférence pour le temps libre à l'âge de l'individu	eq. 2.2	[0,1]	0.108
α_{child}	Sensibilité de la préférence pour le temps libre au nombre d'enfants	eq. 2.3	[0,1]	0.193
α_{yw}	Facteur entrant dans le calcul de la préférence pour le temps libre pour les jeunes femmes ayant des enfants	eq. 2.3	[0,20]	11.6
$\sigma_{coreProd}$	Écart type de la distribution du noyau de productivité des individus	eq. 2.1	[0,1]	0.193
Txp	Temps passé hors de l'emploi à partir duquel l'individu commence à perdre du capital humain (en semaines)	section 2.3.1.2	[0,100]	33
Lxp	Pourcentage de diminution du capital humain chaque semaine après Txp périodes passées hors de l'emploi	section 2.3.1.2	[0,0.1]	0.93%
β	Facteur de sensibilité au capital humain général	eq. 2.22	[0,0.1]	0.00396
β_0	Facteur de sensibilité au capital humain du niveau de qualification Employé/Ouvrier	eq. 2.22	[0,0.1]	0.00151
β_1	Facteur de sensibilité au capital humain du niveau de qualification Professions intermédiaires	eq. 2.22	[0,0.1]	0.0023
β_2	Facteur de sensibilité au capital humain du niveau de qualification Cadres	eq. 2.22	[0,0.1]	0.00394
β'	Facteur de sensibilité au capital humain général	eq. 2.22	[0,0.1]	6.42×10^{-7}
β'_0	Facteur de sensibilité au capital humain du niveau de qualification Employé/Ouvrier	eq. 2.22	[0,0.1]	5.87×10^{-7}
β'_1	Facteur de sensibilité au capital humain du niveau de qualification Professions intermédiaires	eq. 2.22	[0,0.1]	3.88×10^{-9}
β'_2	Facteur de sensibilité au capital humain du niveau de qualification Cadres	eq. 2.22	[0,0.1]	7.22×10^{-8}
ET	Seuil d'employabilité pour un individu	eq. 2.58	[0,1000]	124
$ICHANG$	Coût psychologique face au changement	section 2.6.5.2	[1,2]	1.26
Ru_1	Paramètre qui entre dans le calcul de l'utilité de réservation du chômeur	eq. 5.4.1.3	[0,2]	0.99
Ru_1^*	Paramètre qui entre dans le calcul de l'utilité de réservation du PARAE	eq. 2.72	[0,2]	1.49
Ru_2	Paramètre qui entre dans le calcul de l'utilité de réservation du PARAE et du chômeur	eq. 5.4.1.3	[0,1]	0.158
Ru_3	Pourcentage de décroissance de l'utilité de réservation chaque semaine	eq. 2.62	[0,0.005]	0.0043
$FailT$	Temps au bout duquel un individu au chômage se décline (en semaines)	section 2.6.5.3	[0,1000]	191
$PrBQ$	Probabilité d'obtenir une offre d'emploi d'un niveau de qualification supérieur pendant la recherche d'emploi	section 2.6.5.7	[0,1]	0.014
σ_C	Facteur d'aléa du facteur de forme de l'individu	eq. 2.4	[0,0.3]	0.092

TABLE 4.7 – Les paramètres relatifs aux individus

Nous observons que le paramètre de préférence de base pour le temps libre α_0 est calibré avec une valeur relativement faible de 0.07. Mais dans l'équation 2.2, ce paramètre est multiplié par d'autres facteurs, α_{old} , α_{base} . La valeur effective de la préférence pour le temps libre des agents dans la simulation est de 0.28. Cette valeur a un impact important sur les taux d'activité qui sont bien reproduits. D'après l'équation 2.34, les élasticités de l'utilité par rapport au travail ($W = In + Am + St$) et par rapport au temps libre ($L = FT$) sont respectivement égales à $e_{U,W}(W, L) = 1 - \alpha$ et $e_{U,L}(W, L) = \alpha$. Le taux marginal de substitution du temps libre par rapport au travail est $\tau_{L,W} = (\frac{1}{\alpha} - 1) \times \frac{L}{W}$. Dans notre cas, les agents ont en moyenne une plus grande préférence pour le travail, car avec $\alpha = 0.28$, nous obtenons $e_{U,W} = 0.72$, $e_{U,L} = 0.28$ et $\tau_{L,W} = 2.56 \times \frac{L}{W}$. Donc si on augmente le revenu du travail de 30%, l'utilité augmente de 21.6%; pour une même augmentation du temps libre, l'utilité augmente seulement de 8.4%.

Les paramètres β_0 , β_1 et β_2 d'augmentation de la productivité avec le capital humain qui interviennent dans l'équation 2.22 sont bien croissants avec le niveau de qualification de l'individu. On note que le temps avant lequel les individus perdent du capital humain s'ils n'occupent pas d'emploi, Txp , est calibré à la valeur de 33 semaines, ce qui correspond à 8 mois environ, ce qui semble plausible. Par ailleurs, le paramètre $ICHANG$ de coût psychologique face au changement est calibré à la valeur de 1.26. Il faut donc 26% d'utilité en plus pour que l'individu décide de changer d'état. C'est une valeur qui semble un peu élevée. Nous ferons une analyse de sensibilité de ce paramètre dans le chapitre suivant pour comprendre son influence sur les comportements des agents.

Le paramètre d'initialisation de l'utilité de réservation pour les employés qui commencent une recherche d'emploi Ru_1^* est déterminé à la valeur 1.49. Il est largement supérieur à celui pour les chômeur Ru_1 de 0.99. Les individus qui ont déjà un emploi et qui commencent une recherche sont donc plus exigeants que les individus qui sont au chômage, ce qui semble réaliste.

4.2.5.3 Les paramètres calibrés relatifs aux entreprises

Paramètre	Description	Référence	Plage	Valeur calibrée
μ_0	Productivité horaire de base pour les postes d'Employés/Ouvriers	eq. 2.5	[0, 100]	4.92
μ_1	Productivité horaire de base pour les postes de Professions Intermédiaires	eq. 2.5	[0, 100]	5.53
μ_2	Productivité horaire de base pour les postes de Cadres	eq. 2.5	[0, 100]	6.88
ζ	Part de la productivité en valeur retenue par la firme	eq. 2.6	[0, 1]	0.71
PT	Seuil de profit. Avec un profit, en dessous de $-PT$ la firme met en place un plan de licenciement	section 2.3.2.3	[0, 1]	0.22%
μ_{Ψ_0}	Part moyenne de demande allouée par la firme aux postes d'Employés/Ouvriers	eq. 2.9	[0, 1]	33.5%
μ_{Ψ_1}	Part moyenne de demande allouée par la firme aux postes de Professions Intermédiaires	eq. 2.9	[0, 1]	28.1%
μ_{Ψ_2}	Part moyenne de demande allouée par la firme aux postes de Cadres	eq. 2.9	[0, 1]	38.4%
μ_{max}	Maximum du facteur de tendance de la part de marché de l'entreprise	eq. 2.12	[0, 0.3]	0.0052
μ_{alea}	Écart type du facteur de tendance de la part de marché de l'entreprise	eq. 2.12	[0, 0.1]	0.0020
σ_{max}	Maximum du facteur d'alea de la part de marché de l'entreprise	eq. 2.13	[0, 0.3]	0.037
σ_{alea}	Écart type du facteur d'alea de la part de marché de l'entreprise	eq. 2.12	[0, 0.1]	0.0033
$PrMid$	Probabilité qu'un poste soit à mi-temps	section 2.3.3.1	[0, 1]	0.287
$MaxHCgeneralReq$	Niveau maximal de capital humain général requis sur un poste	section 2.3.3.1	[0, 10000]	1517
$MaxHCocCReq$	Niveau maximal de capital humain général dans la qualification requis sur un poste	section 2.3.3.1	[0, 10000]	8.5
$MaxHCspecReq$	Niveau maximal de capital humain spécifique requis sur un poste	section 2.3.3.1	[0, 10000]	127
PTr^{gen}	Paramètre de sensibilité au capital humain général manquant pour déterminer les coûts de formation à l'embauche	eq. 15	[0, 10]	0.117
PTr_q^{occup}	Paramètre de sensibilité au capital humain dans la qualification manquant pour déterminer les coûts de formation à l'embauche	eq. 16	[0, 10]	1.51
PTr^{spec}	Paramètre de sensibilité au capital spécifique manquant pour déterminer les coûts de formation à l'embauche	eq. 14	[0, 10]	0.0228

TABLE 4.8 – Les paramètres relatifs aux entreprises

Paramètre	Description	Référence	Plage	Valeur calibrée
σ_0	Écart type de base de l'estimation de productivité par l'entreprise	eq. 2.42	[0, 0.5]	0.224
δ_σ	Facteur de décroissance de σ_0 avec l'ancienneté sur le poste	eq. 2.42	[0, 0.1]	0.0032
ω_{-1}	Poids du scénario pessimiste dans l'anticipation de la demande	eq. 24	[0, 1]	78.9%
ω_0	Poids du scénario neutre dans l'anticipation de la demande	eq. 24	[0, 1]	14.5%
ω_{+1}	Poids du scénario optimiste dans l'anticipation de la demande	eq. 24	[0, 1]	6.56%
N_1	Paramètre qui entre dans le calcul de la norme d'embauche	eq. 2.50	[0, 1]	0.38
N_2	Paramètre qui entre dans le calcul de la norme d'embauche	eq. 2.50	[0, 1]	0.017
N_3	Paramètre qui entre dans le calcul de la norme d'embauche	eq. 2.50	[0, 1]	4.73×10^{-5}
N_4	Pourcentage de décroissance de la norme d'embauche chaque semaine	eq. 2.78	[0, 0.2]	11.7%
SF	Part des firmes qui créent des CDD d'usage	section 2.4.1.1	[0, 1]	15.7%
$InitV$	Part de demande allouée pour créer les premiers postes vacants à l'initialisation	section 4.1.3.2	[0, 1]	0.113
$PrCVac_{CDD}$	Paramètre qui entre dans le calcul du coût de maintien d'un poste vacant avec un CDD	eq. 2.28	[0, 10]	0.784
$PrCVac_{CDI}$	Paramètre qui entre dans le calcul du coût de maintien d'un poste vacant avec un CDI	eq. 2.28	[0, 10]	5.7
S_λ^*	Part de l'augmentation de la productivité avec le capital humain spécifique répercutée sur le salaire	eq. 2.24	[0, 1]	0.636
ρ	Paramètre qui entre l'évaluation de la justification d'un licenciement personnel	eq. 2.54	[0.7, 0.9]	0.8
DT	Seuil de demande au delà duquel la création d'un poste est envisagée	section 2.6.1	[0, 1000]	413
$SenT$	Niveau minimum d'ancienneté d'un salarié pour être éligible à une promotion	section 2.6.5.8	[0, 1000]	556

TABLE 4.9 – Les paramètres relatifs aux entreprises

Concernant les entreprises, nous observons que le niveau de productivité de base des postes qui représente leurs niveaux technologiques, μ_0 , μ_1 et μ_2 , sont bien croissants avec le niveau de qualification.

La part de la production en valeur conservée par la firme ζ est calibrée à la valeur de 71%. Le salaire de base correspond donc à 29% de la valeur de la production de base du poste (cf. équation 2.6). C'est une valeur qui peut paraître faible, mais elle n'inclut pas les charges sociales associées au poste. Le salaire brut correspond à environ 1,8 fois le salaire net avec les charges. En multipliant par 1.8, on obtient donc des salaires équivalents à environ 50% de la production en valeur des employés. Les 50% restant sont utilisés par la firme pour payer par exemple les coûts des équipements et des machines, les intérêts bancaires, les impôts sur les sociétés et faire des bénéfices. Nous étudierons la sensibilité de ce paramètre ζ dans le

chapitre suivant.

Nous observons une domination très nette du coefficient de pessimisme ω_{-1} qui intervient dans la pondération des différents scénarios des entreprises dans leur mécanisme d'anticipation (cf. équation 24 de l'annexe C). Il prend la valeur de 78.9 % alors que le coefficient pour le scénario neutre est à 14.5% et le coefficient pour le scénario optimiste est à 6.56% . C'est un premier résultat du modèle. Il apparaît que les employeurs ne sont pas parfaitement rationnels. Ils accordent plus d'importance au scénario pessimiste d'évolution de la demande dans leurs évaluations, par peur de faire des pertes ou de faire faillite. Nous verrons que ce paramètre est un facteur déterminant dans le choix des contrats CDD ou CDI et a une grande influence sur le taux de chômage.

4.3 Bilan du chapitre

Nous avons présenté dans la section 4.1 la méthode de mise à l'échelle du modèle de façon à reproduire la situation du marché du travail français en 2011 et à travailler avec de l'ordre de 10 000 agents *entreprise privée* et *individu*. Nous avons ensuite présenté dans la section 4.2 la méthode de calibration du modèle. Du point de vue de la validation, ce processus de calibration assure que le modèle est capable de reproduire des données réelles et qu'il permet l'émergence de faits stylisés du marché du travail, comme la répartition des principaux stocks de chômeurs et d'inactifs par âge, les mouvements de main-d'oeuvre et l'augmentation du chômage de long terme avec l'âge (cf. tableaux 4.5 et 4.6). Au niveau microéconomique, les paramètres de comportements des agents ne prennent pas de valeurs qui semblent irréalistes.

Cette calibration peut être vue comme une condition nécessaire mais qui n'est pas suffisante pour complètement valider le modèle. Pour apporter d'autres éléments de validation du modèle, nous confronterons dans le chapitre suivant des sorties du modèles, qui ne sont pas des cibles de la calibration, avec des données statistiques observées. Nous effectuerons également des analyses de sensibilité des principaux paramètres du modèle.

Chapitre 5

Analyses du modèle

Dans ce chapitre, nous présentons une première série d'analyses du modèle calibré dans le chapitre 4 suivant plusieurs axes de façon à apporter d'autres éléments de validation du modèle en plus de la reproduction des cibles de la calibration (Klügl, 2008).

Nous tenterons aussi de caractériser le marché du travail français et de comprendre quels sont les déterminants du chômage par catégorie d'âge et par niveau de qualification en descendant au niveau mésoscopique des flux du modèle et au niveau microéconomique des agents.

Ainsi nous analysons :

- les flux du marché du travail ;
- les diagrammes de transitions des individus ;
- les raisons du chômage ;
- les sensibilités des principaux paramètres du modèle

5.1 Les flux du marché du travail français

5.1.1 Comparaison avec les DMMO

Les Déclarations de mouvement de main-d'œuvre (DMMO) sont la seule source qui mesure les principaux flux bruts entre le chômage et l'emploi. Il est intéressant de vérifier si les autres types de flux qui n'étaient pas dans la fonction de *fitness* sont correctement reproduits. Pour cela, nous comparons les mouvements de main d'œuvre calculés par WorkSim avec ceux calculés par la DARES (DARES, 2012) et établis sur la base des Déclarations Mensuelles des Mouvements de Main-d'-Oeuvre (DMMO) et l'Enquête sur les mouvements de Main-d'Oeuvre (EMMO). D'après (DARES, 2012) :

- La Déclaration Mensuelle des Mouvements de Main-d'Oeuvre est effectuée chaque mois par les établissements de 50 salariés ou plus. Ces établissements adressent à l'administration un relevé détaillé des contrats conclus ou résiliés durant le mois précédent.
- L'Enquête sur les mouvements de main-d'œuvre est réalisée chaque trimestre par la DARES qui interroge les établissements d'1 à 49 salariés à l'aide d'un questionnaire com-

parable au formulaire déclaratif. Environ 50 000 établissements du secteur concurrentiel sont interrogés.

Pour effectuer une comparaison rigoureuse avec cette enquête, nous calculons des flux qui portent sur le même champ, c'est-à-dire uniquement aussi pour les entreprises privées du modèle avec au moins 1 salarié. Ces taux d'entrée et de sortie sont des ratios entre les nombres bruts d'entrée et de sortie de l'emploi pendant l'année 2011 divisé par l'effectif moyen sur la période (Ces taux ne sont pas des probabilités de changement d'état). Nous notons en gras les sorties du modèle dans le tableau qui étaient des cibles de la calibration.

	Sorties WorkSim				Source : Dares. DMMO/EMMO			
	Ensemble	< 30	30 à 49	> 50	Ensemble	< 30	30 à 49	> 50
Taux d'entrée	46.1	88.2	35.6	30.1	51.0	115.0	36.6	23.7
Taux d'entrée en CDD	36.9	67.1	29.2	25.8	40.0	92.1	27.5	19.2
Taux d'entrée en CDI	9.2	21.1	6.4	4.3	11.1	23.0	9.1	4.6
Taux de sortie	43.7	67.7	35.1	40.9	49.4	104.3	36.0	28.2
Taux de fin de CDD	29.4	49.3	24.6	21.7	35.2	79.2	24.6	17.9
Taux de démission	5.5	8.1	5.3	3.5	4.2	13.9	5.4	2.2
Taux de fin de période d'essai	2.3	5.6	1.5	1.0	2.0	4.9	1.4	0.6
Taux de licenciement eco.	0.47	0.32	0.39	0.79	0.5	0.4	0.5	0.6
Taux de licenciement perso.	3.0	4.3	3.3	0.9	3.2	4.3	3.1	2.5

TABLE 5.1 – Comparaison des taux de rotation par âge WorkSim/Dares

La médiane des écarts relatifs absolus entre les flux par âge calculés par WorkSim et ceux obtenus par les DMMO est de 16.8%. Pour chacun des flux, nous retrouvons des ordres de grandeurs acceptables et la hiérarchie des taux par âge est toujours bien respectée.

Nous observons notamment que nous reproduisons bien un taux beaucoup plus important de fins de période d'essai et de licenciements personnels pour les jeunes par rapport aux autres catégories d'âge, ce qui est conforme à la réalité. On observe aussi que les jeunes sont aussi plus enclins à démissionner que les plus âgés car ils prennent du temps avant de trouver un emploi qui leur convient. Par contre, le taux de licenciement économique est bien plus important pour les seniors que pour les jeunes, ce qui vient du fait que les seniors sont les employés qui coûtent le plus cher. Ils ont donc plus de chance d'être licenciés lors de la mise en place d'un plan de licenciement dans le modèle. Cette comparaison avec les DMMO permet de valider la cohérence du modèle des flux par âge.

Les flux par niveaux de qualifications calculés par WorkSim (cf. Table 5.2) sont proches aussi des DMMO. La médiane des écarts relatifs absolus entre les flux par niveau de qualification calculés par WorkSim et ceux obtenus par les DMMO est de 15.4%

Les Employés/Ouvriers sont la catégorie socioprofessionnelle qui est caractérisée par le plus fort d'entrée et de sortie de l'emploi.

On observe que le taux d'entrée en CDI est plus important pour les Employés/Ouvriers que pour les autres niveaux de qualification mais ces CDI sont en moyenne plus courts dans la simulation (de 3.1 ans en moyenne alors que la durée moyenne est de 3.7 ans et de 4.9 ans

	Sorties WorkSim			Source : Dares. DMMO/EMMO		
	E/O	PI	Cadres	E/O	PI	Cadres
Taux d'entrée	62.9	39.2	23.4	66.3	33.4	28.9
Taux d'entrée en CDD	52.3	31.3	15.3	53.8	25.9	19.0
Taux d'entrée en CDI	10.6	7.9	8.1	12.5	7.4	10.0
Taux de sortie	58.5	37.7	23.7	63.9	32.9	27.5
Taux de fin de CDD	41.6	25.7	11.5	46.1	24.0	17.8
Taux de démission	6.5	4.9	4.4	8.0	4.1	4.6
Taux de fin de période d'essai	3.0	1.7	1.8	2.6	1.0	0.9
Taux de licenciement eco.	0.34	0.55	0.59	0.63	0.4	0.4
Taux de licenciement perso.	4.1	2.1	2.0	4.2	2.0	2.3

TABLE 5.2 – Comparaison des taux de rotation par niveau de qualification WorkSim/Dares

respectivement pour les professions intermédiaires et les cadres). Il y a en effet plus de démissions, de fins de période d'essai et de licenciements personnels pour les employés/ouvriers. Cependant, on note que le ratio du taux d'entrée en CDI sur le taux d'entrée total est bien plus faible pour les employés/ouvriers que pour les autres CSP. C'est la catégorie la plus précaire sur le marché du travail.

5.1.2 Comparaison des taux de transitions annuelles avec l'enquête emploi

Un autre exercice est de comparer les taux de transitions annuelles calculés par le modèle avec ceux obtenus de façon empirique à partir de l'enquête emploi en 2011 (INSEE, 2011). La plupart des études empiriques sur les flux d'emploi utilisent ces données. Ces transitions sont calculées à partir des résultats de questionnaires en comparant l'état d'un individu l'année n avec son état l'année $n - 1$. Ces flux comptabilisent les transitions entre deux dates, mais ne capturent pas les transitions intermédiaires qui ont pu avoir lieu entre ces deux dates. Par exemple, un individu peut être en emploi au début de l'année, puis être licencié deux fois dans l'année, mais retrouver un nouvel emploi à chaque fois. A la fin de l'année, l'individu est donc à nouveau en emploi. On compte dans ce cas, une transition EE, de l'emploi vers l'emploi, mais deux transitions de l'emploi vers le chômage et deux transitions du chômage vers l'emploi, ont en fait eu lieu pendant cette année. Ces flux sous-estiment donc considérablement les mobilités des individus contrairement aux flux des DMMO.

Ces taux peuvent être aussi être vus comme des probabilités de changement d'état d'une année sur l'autre. Par exemple la probabilité calculée par WorkSim pour un individu en emploi d'être au chômage l'année suivante est de 3.3%. Nous reproduisons assez finement les taux EC et CC par niveau de qualification et pour l'ensemble des individus (cf. Table 5.3). Les Taux CE du chômage vers l'emploi sont par contre trop élevés. Cela peut s'expliquer un flux CI du chômage vers l'inactivité trop faible. Ainsi, il faudrait affiner le mécanisme de découragement des chômeurs dans le modèle.

	Sorties WorkSim			Source : INSEE, enquête emploi		
	EC	CC	CE	EC	CC	CE
Ensemble	3.3	47.8	46.6	3.2	46.5	34.0
Employés/Ouvriers	3.4	51.1	43.3	4.8	47.5	33.1
Professions intermédiaires	2.9	42.2	52.2	2.0	42.2	42.1
Cadres	2.1	41.1	52.8	1.5	46.7	38.4

EC : Taux de transition de l'Emploi avec le Chômage
 CC : Taux de transition du Chômage avec le Chômage
 CE : Taux de transition du Chômage vers l'Emploi

TABLE 5.3 – Comparaison des taux de transition annuelle

5.2 Diagramme de transitions des individus sur le marché du travail

Dans cette section, nous étudions le diagramme des flux hebdomadaires des individus obtenus à partir de notre simulation. Notre modèle de simulation est un outil pertinent pour caractériser le marché du travail français, c'est à dire obtenir une comptabilité cohérente des "stocks" et des "flux". Les stocks sont les nombres d'individu dans chaque état sur le marché du travail. On les calcule en moyennes sur l'année. Les "flux" sont les nombres d'individu qui passent chaque semaine d'un état à un autre en moyenne sur l'année. La comptabilité est cohérente car tous les stocks et les flux peuvent être déterminés avec exactitude dans le modèle.

L'analyse de ces flux est un premier pas avant d'effectuer des analyses de variante du modèle. Nous verrons qu'un fait stylisé important du marché du travail français émerge : la segmentation (ou dualisme) du marché du travail.

Nous présentons tout d'abord le diagramme de flux du modèle de tous les individus puis par tranche d'âge (15-24, 25-49 et 50-64 ans), calculé à l'échelle réelle pour la France. Chaque type de flux est mesuré de deux façons. Premièrement, le nombre associé à la flèche indique le nombre d'agents qui passent d'un état à un autre pendant une période du modèle, c'est-à-dire pendant une semaine. L'épaisseur du trait représente la force du flux par rapport aux autres flux. Deuxièmement, le pourcentage entre parenthèses indique la proportion d'agents qui changent d'état par rapport au nombre d'agents dans l'état d'origine. Ce pourcentage correspond en fait à la probabilité de changer d'état chaque période. On note que ces probabilités sont très faibles car elles sont calculées sur une base hebdomadaire.

5.2.1 Analyse globale

Nous observons sur le diagramme de tous les individus (cf. Figure 4) que le marché du travail est caractérisé par un important taux de rotation entre les états de "chômeur" et d'"employé en CDD". Le flux *Chômage* → *CDD* est le plus important de tous les flux et il est 4 fois plus important que le flux *Chômage* → *CDI*, qui est le 3ème flux par ordre d'importance. Le flux *CDD* → *Chômage* est un flux important, le second en taille. Le flux *CDI* → *Chômage* est le quatrième flux. Le flux *CDD* → *CDI* représente le 5ème flux avec 14% des sorties du

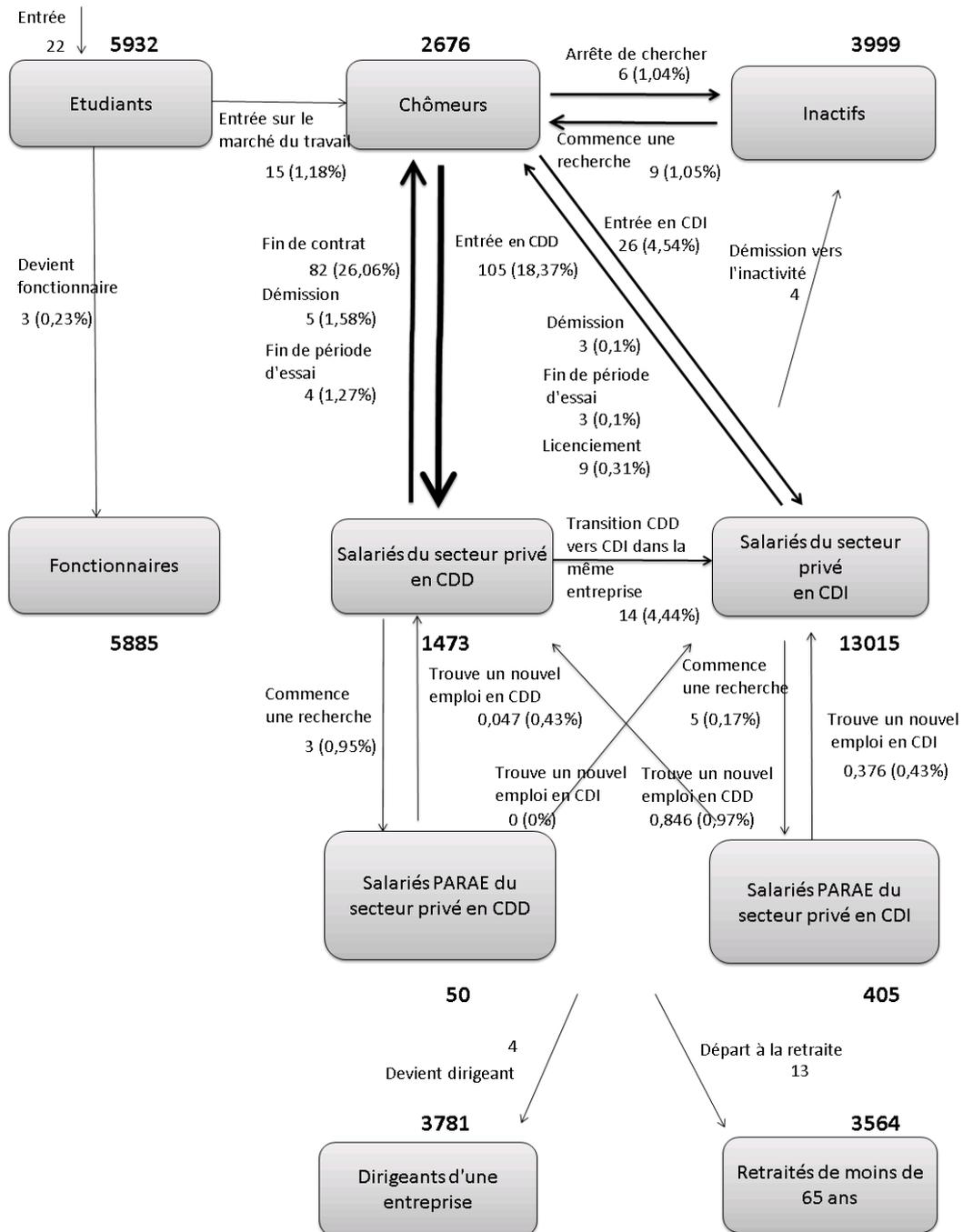


FIGURE 5.1 – Diagramme de flux (tous les individus). Les nombres en gras associés à chaque état sont le nombre d'agents dans chaque état à l'échelle réelle (en milliers). Le nombre associé à la flèche indique le nombre d'agents qui passent d'un état à un autre pendant une semaine (en milliers). Le pourcentage entre parenthèses indique la proportion d'agents qui changent d'état par rapport au nombre d'agents dans l'état d'origine.

CDD. Les autres personnes allant pour la plupart vers le chômage. C'est un indicateur de l'effet tremplin car les CDD offrent aux travailleurs la possibilité de s'intégrer en CDI dans l'entreprise.

Donc une première observation importante est que les CDD génèrent un important flux du chômage vers l'emploi, et de l'emploi vers le chômage, mais à ce stade nous ne pouvons dire si cette précarité est concentrée ou pas sur une petite partie seulement des agents. Il y a deux cas extrêmes avec un continuum de possibilités entre les deux. Une première possibilité est qu'une très petite partie des travailleurs alternent des épisodes très courts et précaires de CDD avec des épisodes de chômage, tandis qu'une autre partie est employée de façon très stable en CDI, même si certains peuvent quand même perdre leur emploi s'ils sont licenciés pour des raisons personnelles ou pour des raisons économiques. Une deuxième possibilité est que les travailleurs licenciés en CDI reçoivent un CDD pendant quelques temps avant d'obtenir éventuellement un CDI plus tard, dans ce cas les CDD sont plus largement distribués parmi les individus.

Cette question est une des plus importantes pour caractériser le marché du travail. Y a-t-il une segmentation (ou dualité) du marché du travail entre deux catégories de travailleurs et d'emplois, avec deux schémas de mobilité ? Certains travailleurs auraient des statuts précaires tandis que d'autres auraient des statuts stables.

Pour étudier cette question de la segmentation, nous avons besoin d'étudier les diagrammes d'état par catégorie d'âge.

5.2.2 Analyse par tranche d'âge

Les diagrammes de flux sont très différents entre les catégories d'âge.

Le diagramme de flux des individus âgés de 15 à 24 ans (cf. diagramme 5.2) apparaît comme étant beaucoup moins stable que pour les autres catégories d'agent (cf. diagramme 5.3 et 5.4). En effet, le ratio du nombre total d'entrées et de sorties de l'emploi chaque semaine divisé par le nombre total d'individus en emploi est de 2.2% pour les jeunes, tandis qu'il est de 1.1% pour les plus âgés (25-49 ans) et de 0.72% pour les seniors.

Le diagramme de flux des jeunes est caractérisé par deux types de mobilités qui le distinguent des autres diagrammes. La première mobilité est le double flux important entre le chômage et le CDD. En proportion par rapport au nombre total d'agents de cette tranche d'âge, ce double flux est beaucoup plus important que pour le reste de la population. Le diagramme de mobilité est donc caractérisé par une instabilité d'une partie des jeunes, les autres trouvant un CDI relativement stable (moins d'1 licenciement pour 15 fins de CDD).

Le diagramme de flux des 25-49 ans est caractérisé par une plus grande stabilité. Le double flux entre chômage et CDD reste important mais plus faible en proportion du nombre d'agents de cette tranche d'âge. Le modèle suggère cependant une relative persistance de la segmentation des jeunes vers la classe d'âge intermédiaire. En effet, les taux de conversion des CDD vers les CDI ne sont pas très importants et les recrutements en CDI non plus. Donc de la précarité subsiste pour cette classe d'âge.

Pour mieux étudier cette question de la segmentation et faire la distinction entre la segmentation temporaire et la segmentation permanente, il faudrait effectuer une analyse des

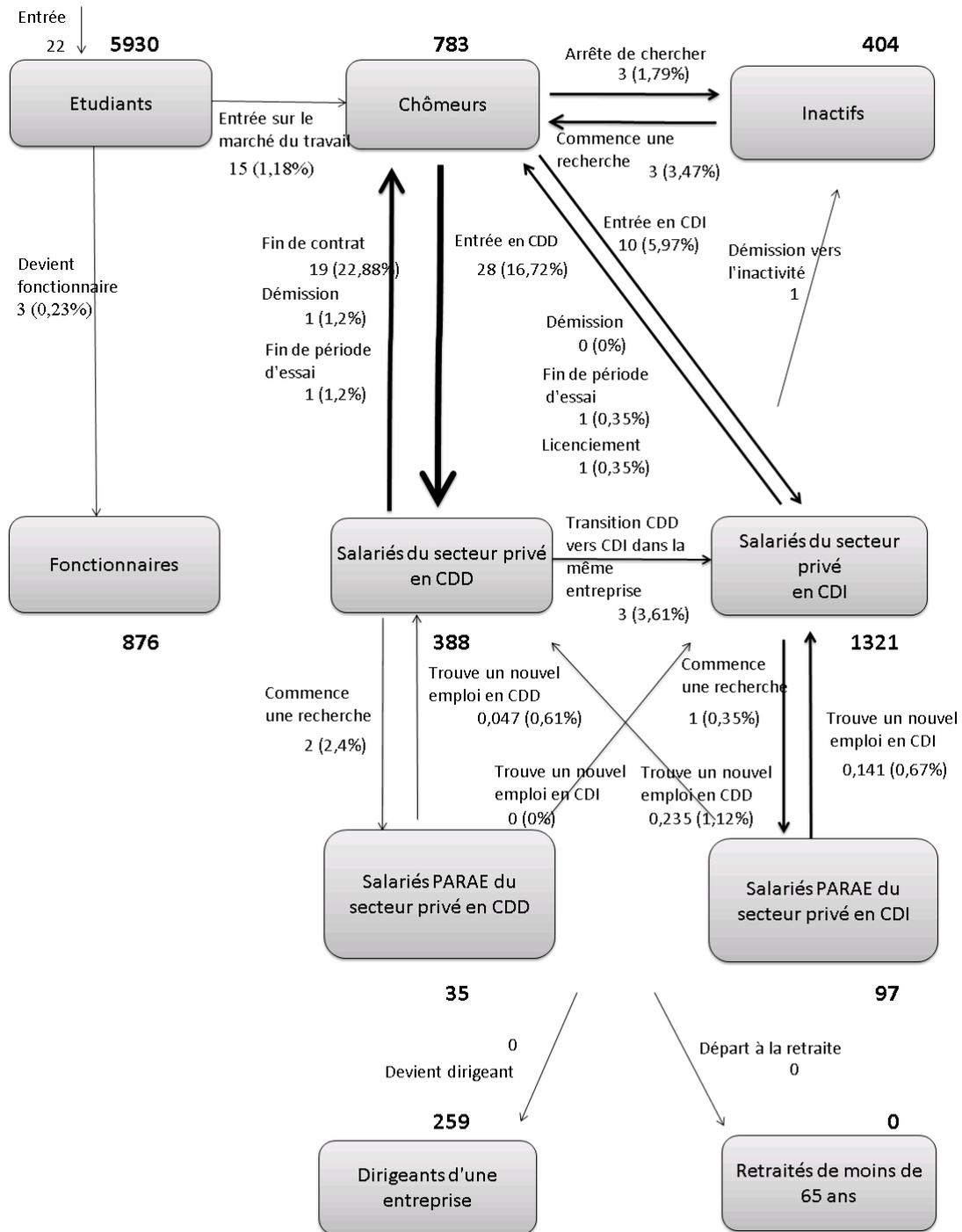


FIGURE 5.2 – Diagramme de flux 15-24 ans

trajectoires des agents sur toute leur carrière. Cette analyse des trajectoires des agents pourrait être réalisée avec des cartes de Kohonen (Grelet, 2002) qui permet de réaliser une typologie des parcours des agents sur le marché du travail.

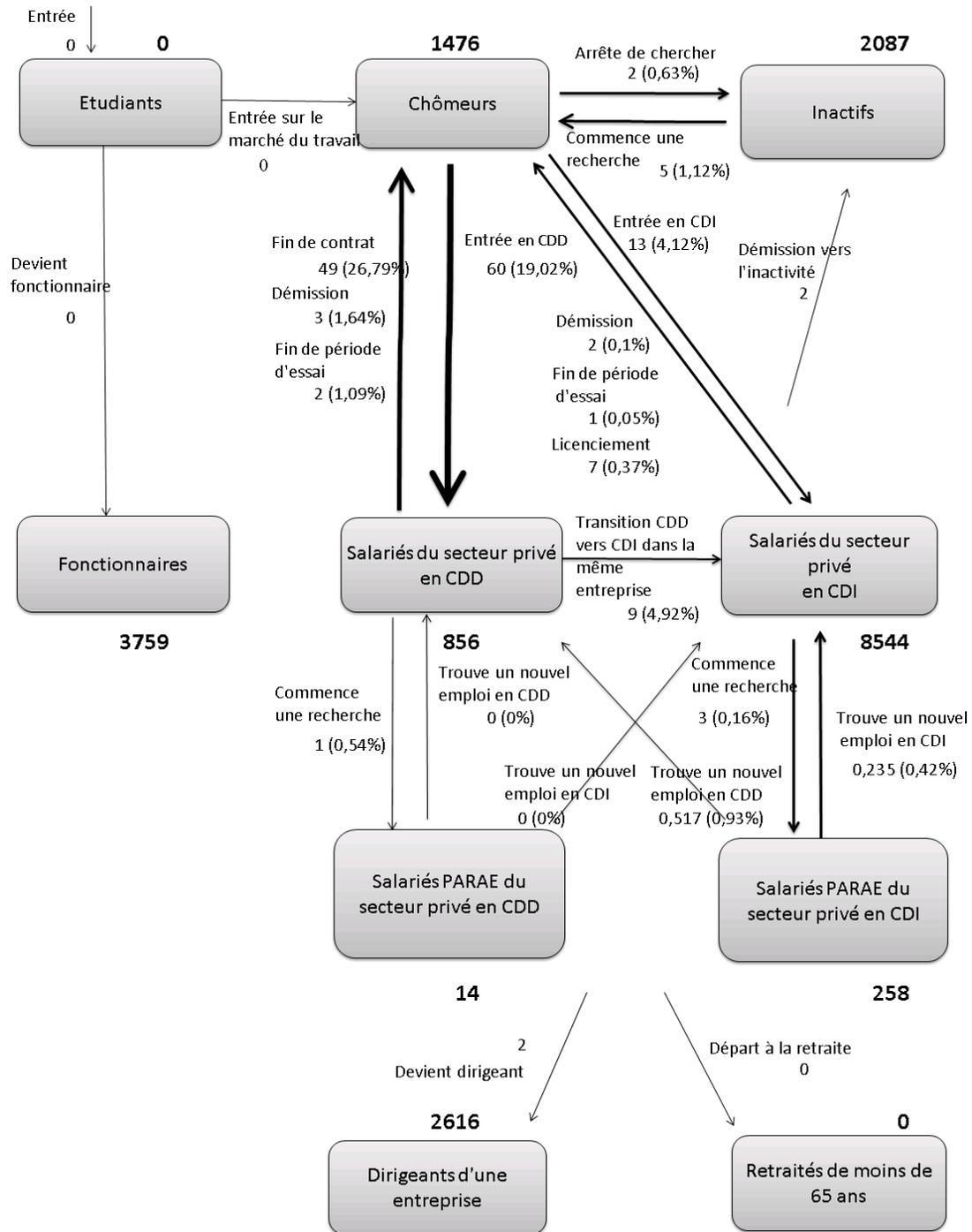


FIGURE 5.3 – Diagramme de flux 25-49 ans

Il est intéressant de constater que la proportion d'individu en CDI augmente avec l'âge, alors que la probabilité d'obtenir un CDI pour un chômeur chaque semaine diminue avec l'âge. Elle est de 4.12% pour les individus de la tranche d'âge 25-49 ans, alors qu'elle était de

5.97% pour les jeunes. Plus l'individu est âgé, plus sa chance de retrouver un emploi en CDI, s'il est licencié, diminue. Ceci met en évidence le plus grand risque d'exclusion pour les plus âgés. Ce phénomène sera confirmé par l'analyse des taux de chômage de long terme dans la section 5.3.

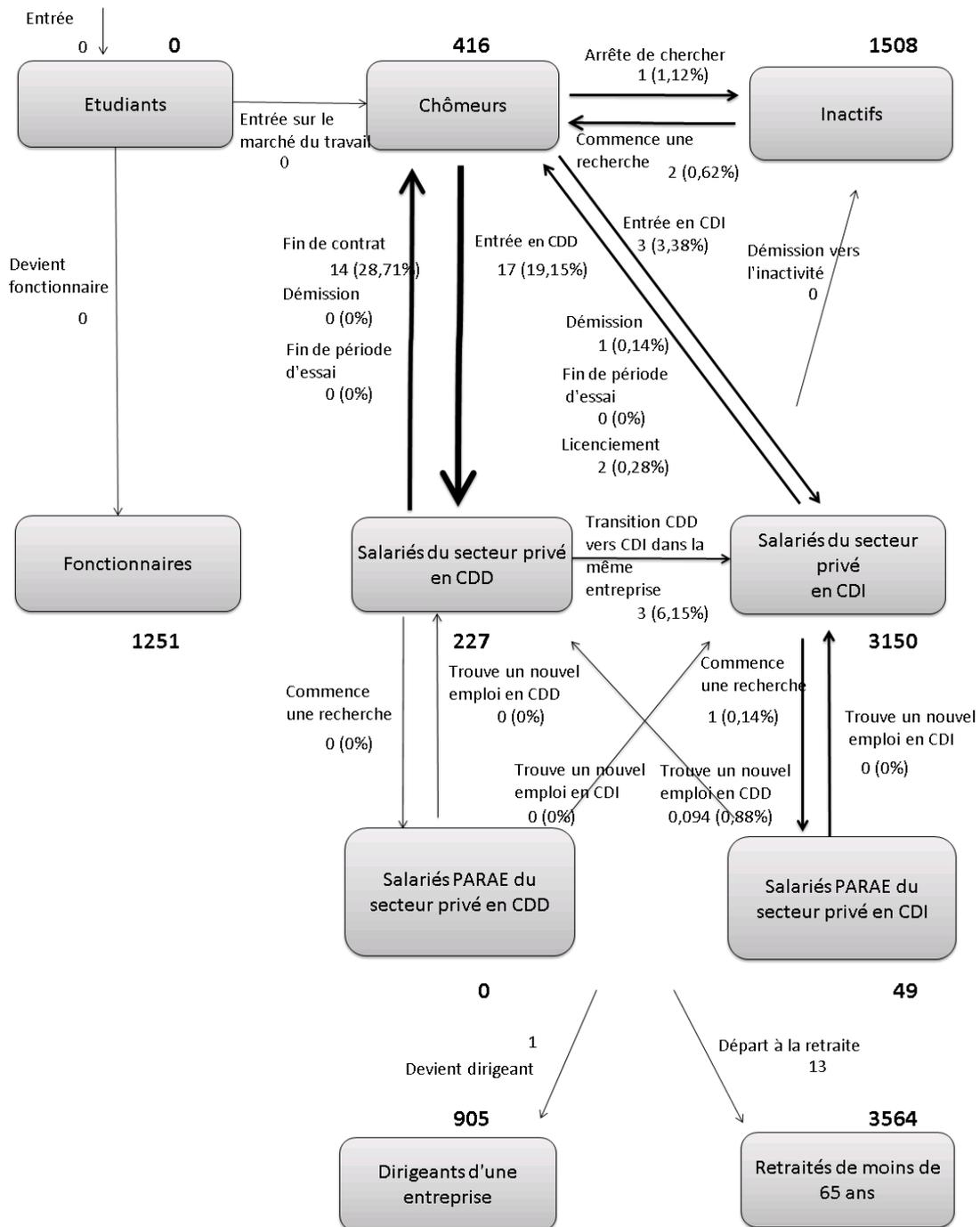


FIGURE 5.4 – Diagramme de flux 50-64 ans

Le marché des seniors (Diagramme 5.4) est plus stable que celui des 25-49 ans. Il est caractérisé par des flux significativement moins importants, avec des taux d'entrée et de sortie de l'emploi plus faibles par rapport au nombre total d'individus en emploi. Un flux important apparaît cependant, c'est le nombre de départs à la retraite (en valeur absolue de 13 00) et qui représentent 29.5% des motifs de sortie de l'emploi.

5.2.3 Analyse par niveau de qualification

Les diagrammes des flux par niveau de qualification sont présentés dans l'annexe H. Il apparaît que la précarité et les flux entre le chômage et l'emploi en CDD sont majoritairement concentrés sur la catégorie des "Employés/Ouvriers". La probabilité de décrocher un CDI chaque semaine pour un chômeur est de 3.76% pour un employé/ouvrier alors qu'elle est de 5.15% pour les professions intermédiaire et de 7.81% pour les cadres.

5.3 Analyse du chômage

5.3.1 Le chômage de long terme

WorkSim permet de calculer des données détaillées sur les caractéristiques du chômage (cf. Table 5.4). Tout d'abord, nous observons que la durée moyenne des épisodes de chômage est beaucoup plus faible que l'ancienneté dans le chômage. Les plus employables trouvent un emploi rapidement.

Le taux de chômage de long terme est de 34.9% dans le modèle WorkSim. Il est de 41.2% dans la réalité (INSEE, 2011). Nous sous-estimons légèrement le chômage de long terme dans la simulation. Ceci peut être dû au fait que nous n'introduisons pas de discriminations particulières à l'embauche pour les chômeurs éloignés de l'emploi (ces chômeurs perdent quand même du capital humain dans la simulation après 8 mois passés sans emploi). La hiérarchie des parts de chômeurs au chômage depuis plus d'un an par âge est bien représentée avec la catégorie des seniors qui est caractérisée par un chômage plus durable (INSEE, 2011).

	Ensemble	15 24 ans	25 49 ans	50 64 ans
Part de chômeur au chômage depuis plus d'un an	37.8%	26.6%	35.2%	49.3%
Ancienneté au chômage (en mois)	11.3	9.6	10.1	14.1
Durée moyenne des épisodes de chômage (en mois)	5.5	5.0	5.5	6.8

TABLE 5.4 – Caractéristiques du chômage par âge

5.3.2 Les raisons du chômage

Nous analysons maintenant les comportements micro-économiques des agents du modèle et les raisons d'être au chômage pour un agent individu à chaque période. Ces diagrammes sont présentés pour l'ensemble des individus et par tranche d'âge 15-24 ans, 25-49 ans et 50-64 ans.

Il apparaît qu'une majorité (67%) des chômeurs sont au chômage car ils ne reçoivent pas d'offres d'emploi qui dépassent leur utilité de réservation. Il faut du temps pour les individus

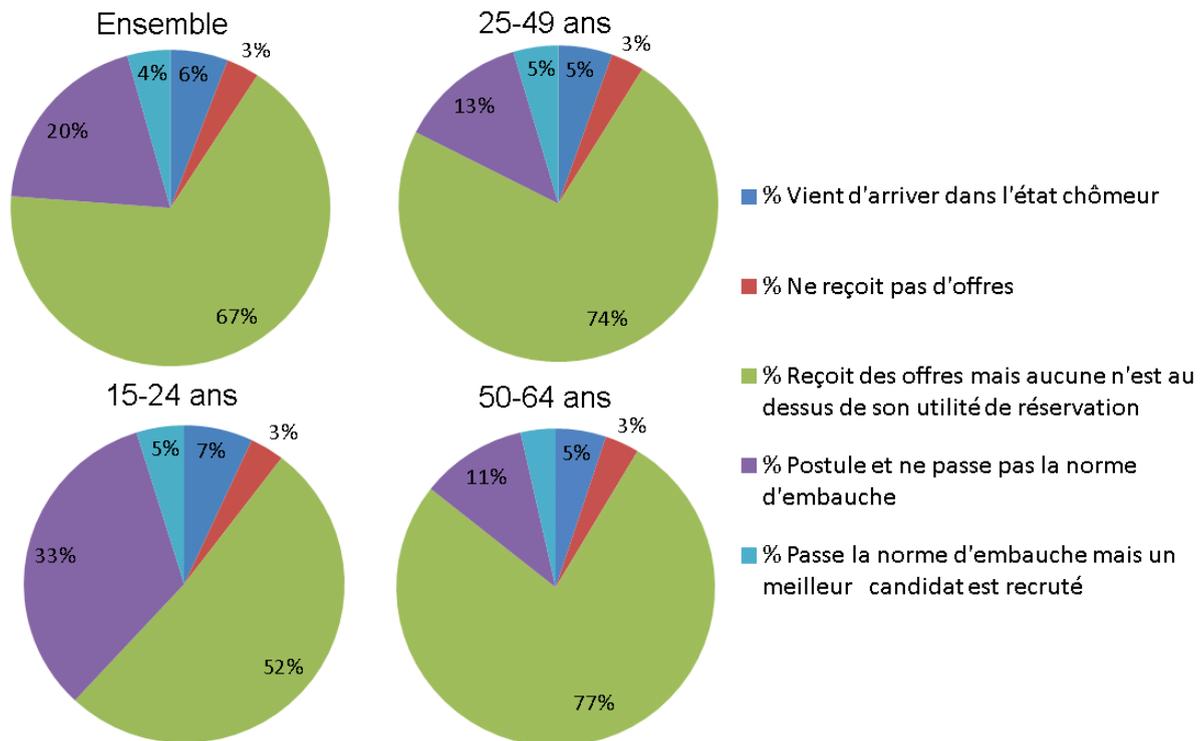


FIGURE 5.5 – Raisons d'être au chômage à chaque période

avant de trouver une offre d'emploi qui convient.

Il y a donc un effet important du chômage de recherche dans le modèle, ce qui est conforme avec l'étude de (Addison *et al.*, 2009) qui montre que le salaire de réservation des chômeurs en France ne baisse pas rapidement. Nous tenterons d'évaluer ce chômage de recherche en faisant varier le paramètre qui joue sur la décroissance de l'utilité de réservation d'un chômeur à chaque période (cf. section 5.4.1.3). Nous verrons que c'est une composante du chômage. A noter cependant que beaucoup de chômeurs qui ont refusé les offres qui leur sont proposées auraient de toute façon été rejetés s'ils avaient postulé du fait de la concurrence entre les individus dans le modèle. De plus, ces individus qui ont refusé des offres ce tour ci, accepterons des offres plus tard, car ils finissent par trouver une offre qui leur convient ou bien réduisent leurs ambitions (ce qui est modélisé par la décroissance de l'utilité de réservation). *Donc on ne peut pas affirmer à ce stade que 67% du chômage global vient directement des refus des individus.* Nous effectuerons une analyse de sensibilité du facteur de décroissance de l'utilité de réservation dans la section 5.4.1.3 pour mieux caractériser la part du chômage de recherche dans le modèle.

La deuxième raison d'être au chômage à chaque période est de ne pas passer la norme d'embauche. Cet effet est plus marqué pour les jeunes, car c'est la catégorie qui a le moins de capital humain. Certains jeunes ne produisent pas assez pour être employables compte tenu de la barrière du SMIC et des coûts de formation à l'embauche.

Parmi les individus qui postulent et qui passent la norme d'embauche, on observe qu'une partie de ceux-ci reste au chômage car un meilleur candidat est recruté. Ceci montre les interactions entre les agents dans le modèle qui sont en concurrence pour trouver une offre d'emploi.

5.4 Analyse de sensibilité des principaux paramètres du modèle

De façon à valider les mécanismes du modèle, nous effectuons des analyses de sensibilité des principaux paramètres. Une analyse de sensibilité consiste à lancer un ensemble de simulations en changeant à chaque fois la valeur d'un paramètre donné pas à pas, les autres restant à leurs valeurs calibrées. Pour chaque point, nous mesurons les sorties du modèle après 104 périodes (2 ans dans la réalité) à partir de la sauvegarde du modèle et nous moyennons les résultats obtenus sur 200 simulations de façon à gommer les effets stochastiques.

Nous analysons les effets de deux catégories de paramètres. Premièrement nous analysons ceux qui ont un rôle important dans les comportements des agents, "individu" et "entreprise privée". Deuxièmement, nous soumettons le modèle à des chocs agrégés exogènes et nous analysons la réponse du modèle.

5.4.1 Analyse de paramètres relatifs aux comportements des agents "individu"

5.4.1.1 La préférence pour le temps libre

Le paramètre α_0 représente la préférence de base pour le temps libre de l'agent "individu". Ce paramètre entre dans le calcul de la préférence effective α pour le temps libre de l'individu (cf. équation 2.2). Plus ce paramètre prend une valeur élevée, plus les individus préfèrent le temps libre par rapport aux revenus du travail et aux caractéristiques non-monétaires des emplois (cf. l'équation 2.34 de la fonction d'utilité). Comme attendu, une augmentation de α_0 conduit à une diminution substantielle du taux d'activité et du taux d'emploi (cf. figure 5.6). Pour le taux de chômage, l'analyse est moins évidente. Quand α_0 diminue à partir de la valeur calibrée, le taux d'activité augmente, il y a donc plus d'individus sur le marché du travail, mais ces individus ne trouvent pas tous un emploi, car on observe que le taux d'emploi n'augmente que très légèrement ce qui conduit à une augmentation du chômage. Sur la partie droite de la courbe, quand α_0 augmente à partir de la valeur calibrée, une partie des employés démissionne vers l'inactivité et le taux d'emploi diminue. L'effet sur le chômage apparaît comme stable car il y a à la fois moins de chômeurs mais aussi moins d'employés.

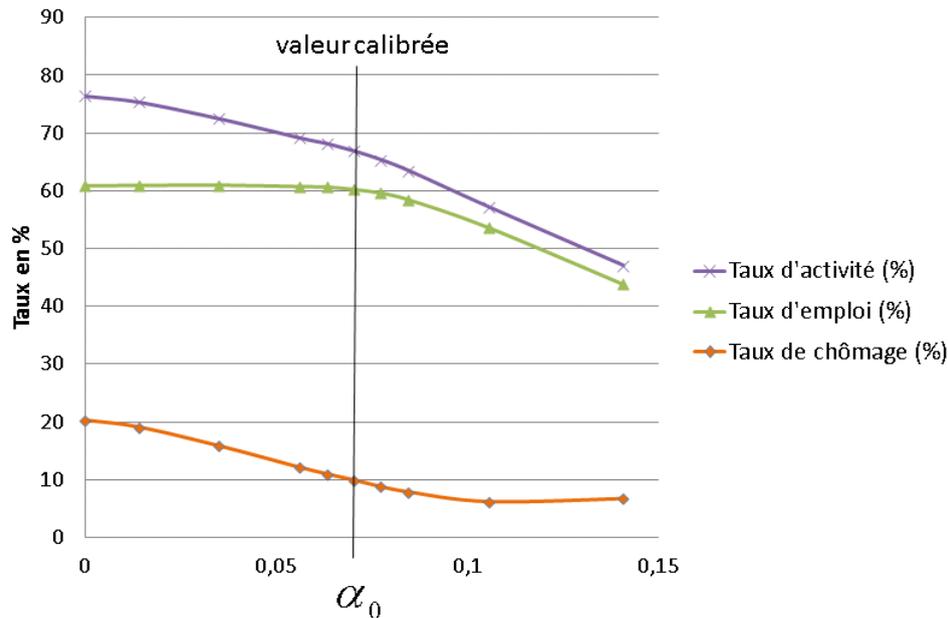


FIGURE 5.6 – Sensibilité à la préférence de base pour le temps libre α_0

5.4.1.2 Le coût psychologique face au changement

La mobilité, ou son inverse la stabilité dans un état, est un élément important pour caractériser le marché du travail. Plus le coût (psychologique ou économique) de changer d'état *ICHANG* augmente, moins les agents "individus" sont mobiles et décident de changer d'état (cf. section 2.6.5).

Quand *ICHANG* est égal à 1, il n'y a pas de coût de changement et le taux d'activité est le plus haut comme on peut le voir sur la figure 5.7. En effet, ce paramètre entre dans la décision d'un inactif pour commencer une nouvelle recherche et passer dans l'état de chômeur. Quand *ICHANG* décroît à partir de sa valeur calibrée de 1.26 jusqu'à devenir proche de 1, nous voyons sur le figure 5.8 que le taux de démission augmente considérablement, parce que les individus ayant un emploi en recherchent un autre et quittent leur propre emploi. Cette *instabilité individuelle* conduit à plus de rotations sur le marché du travail. Elle accroît le taux de chômage jusqu'à la valeur de 24,1% et diminue le taux d'emploi jusqu'à la valeur de 55.0% (cf. figure 5.7).

Sur la droite du graphique, quand *ICHANG* augmente à partir de sa valeur calibrée, le taux de chômage diminue jusqu'à la valeur de 5.73%, mais principalement à cause d'une décroissance du taux d'activité. Le taux d'emploi augmente très peu (il passe de 60.35% à 60.53%).

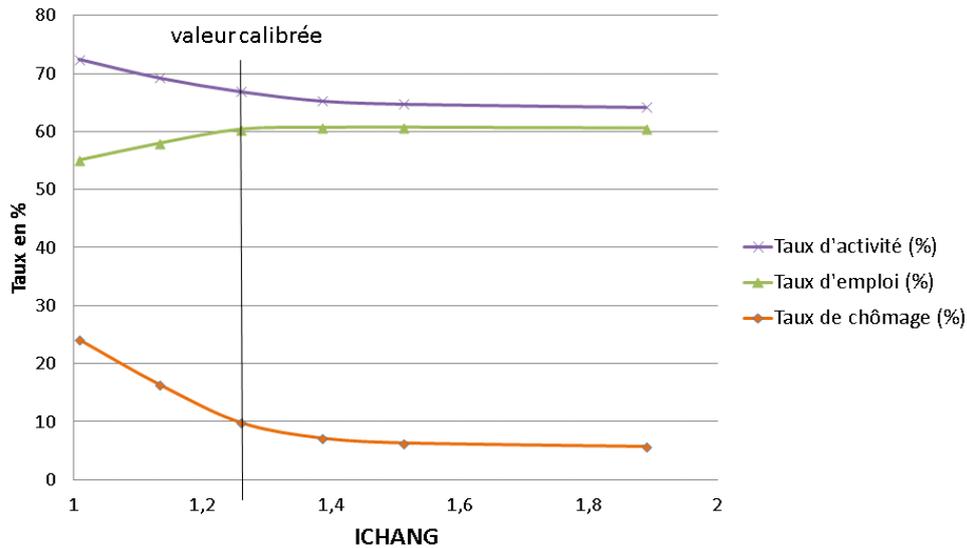


FIGURE 5.7 – Sensibilité au coût face au changement *ICHANG*

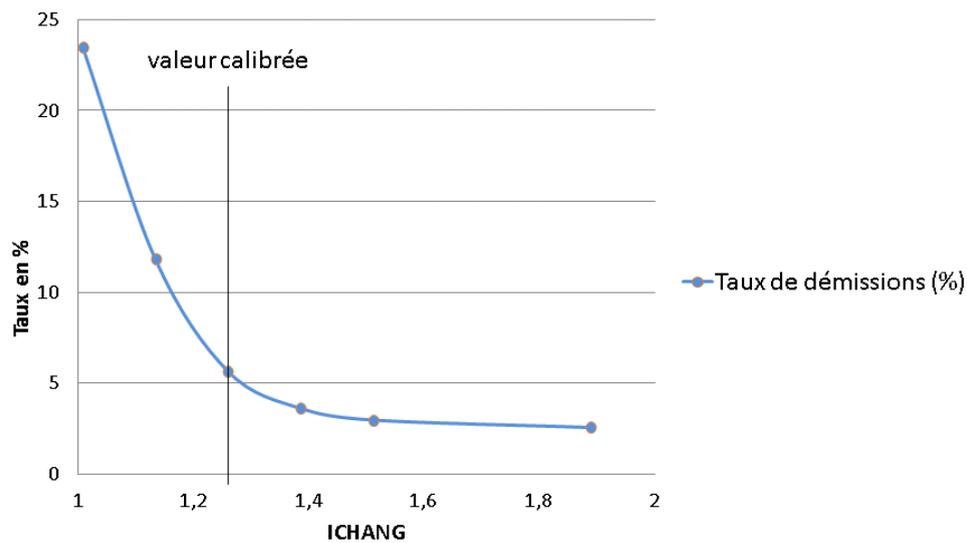


FIGURE 5.8 – Sensibilité au coût face au changement *ICHANG*

5.4.1.3 Décroissance de l'utilité de réservation avec l'ancienneté dans le chômage

Dans notre modèle de recherche, le paramètre Ru_3 qui intervient dans l'équation 2.62 a un rôle important, c'est le pourcentage de décroissance de l'utilité de réservation des individus chaque semaine passée dans le chômage. Plus ce facteur Ru_3 prend une valeur élevée, plus l'utilité de réservation des chômeurs décroît vite dans le modèle.

Nous voyons sur la figure 5.10 que plus la valeur de ce paramètre augmente, plus le taux de chômage diminue, car les chômeurs révisent plus rapidement à la baisse leur utilité de

réserve dans leur processus de recherche d'emploi et acceptent donc un plus grand nombre d'offres d'emploi. Ce qui met en évidence l'existence de chômage de recherche dans le modèle.

Toutefois l'effet sur le chômage que l'on observe (partie droite de la courbe sur la figure 5.9) est principalement dû à un plus grand découragement des chômeurs, car on observe une baisse du taux d'activité. L'effet sur l'emploi reste relativement faible avec une augmentation au maximum de 0.3 point, ce qui correspond à 122 000 emplois en plus à l'échelle réelle. Ceci montre que le problème de l'emploi en France est dû à d'autres causes que le simple refus des chômeurs. Nous mettrons en évidence dans les sections 5.4.3.2 et 5.4.2.2 que des facteurs comme la demande globale et les facteurs psychologiques qui influencent le comportement des employeurs ont des impacts plus importants sur le chômage et l'emploi.

Quand $Ru_3 = 0$, c'est à dire quand les chômeurs ne baissent jamais leur exigences dans leur recherche d'emploi, le chômage est à 14.3%.

En parallèle, la réduction de l'utilité de réserve conduit à plus de découragement des chômeurs (cf. section 2.6.5.3) et le taux d'activité diminue un peu (cf. figure 5.9).

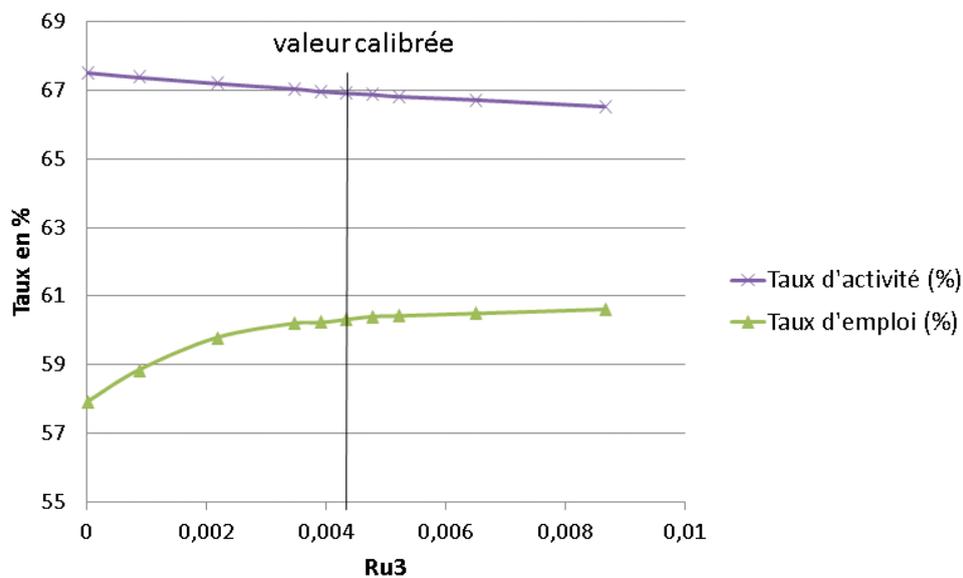


FIGURE 5.9 – Sensibilité au paramètre Ru_3

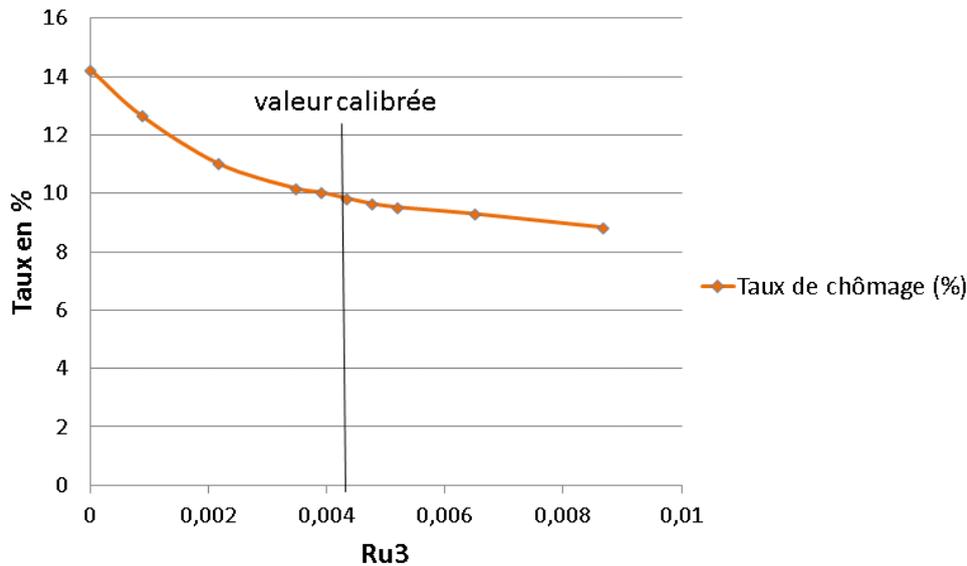


FIGURE 5.10 – Sensibilité au paramètre Ru_3

5.4.2 Analyse de paramètres relatifs aux comportements des agents "entreprise privée"

Nous analysons maintenant des paramètres importants qui entrent en jeu dans les comportements des firmes.

5.4.2.1 Incertitude sur la productivité des employés

Le paramètre σ_0 représente l'incertitude de base des firmes lorsqu'elles évaluent les productions de leurs salariés (cf. equation 2.42). Cette incertitude peut être due à la nature de la tâche associée à l'emploi ou bien à l'impact de l'organisation du travail dans l'entreprise. Nous observons qu'une augmentation de cette incertitude dans les évaluations des entreprises augmente le taux de fin de période d'essai et de taux de licenciement personnel (cf. figure 5.11), car l'entreprise fait plus d'erreurs dans son processus de recrutement. Il est intéressant de constater que l'augmentation de cette incertitude fait décroître la part des chômeurs au chômage depuis plus d'un an (cf. figure 5.13), car la chance d'obtenir un emploi même en étant peu employable est plus importante quand les entreprises font plus d'erreurs dans leur processus de recrutement. On assiste à un remplacement d'un effet d'éviction des peu productifs par l'effet du hasard qui ne trie pas.

L'effet global sur le chômage d'une augmentation de cette incertitude est par contre très faible (cf. figure 5.12) car deux effets semblent se compenser. Il y a plus de licenciements et de fins de période d'essai, mais moins de chômage de long terme.

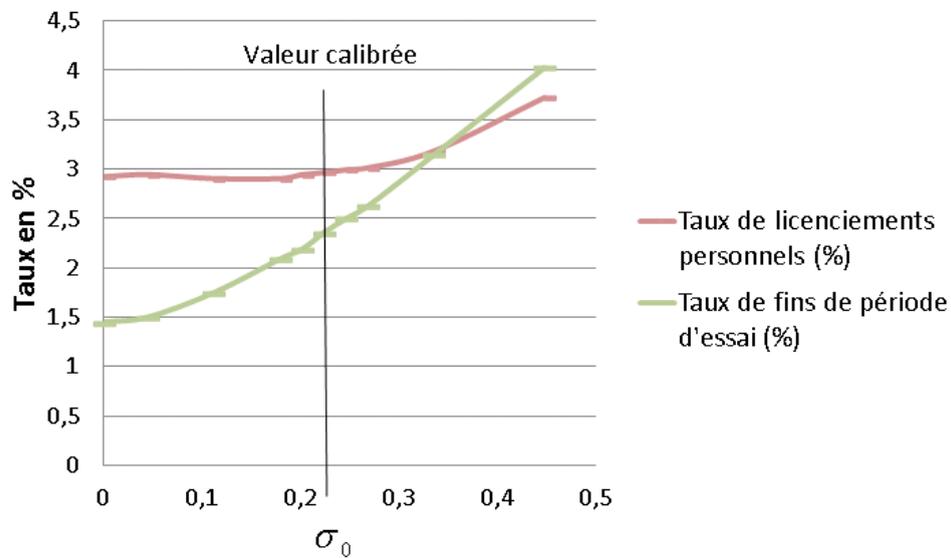


FIGURE 5.11 – Sensibilité au facteur d'incertitude sur la productivité

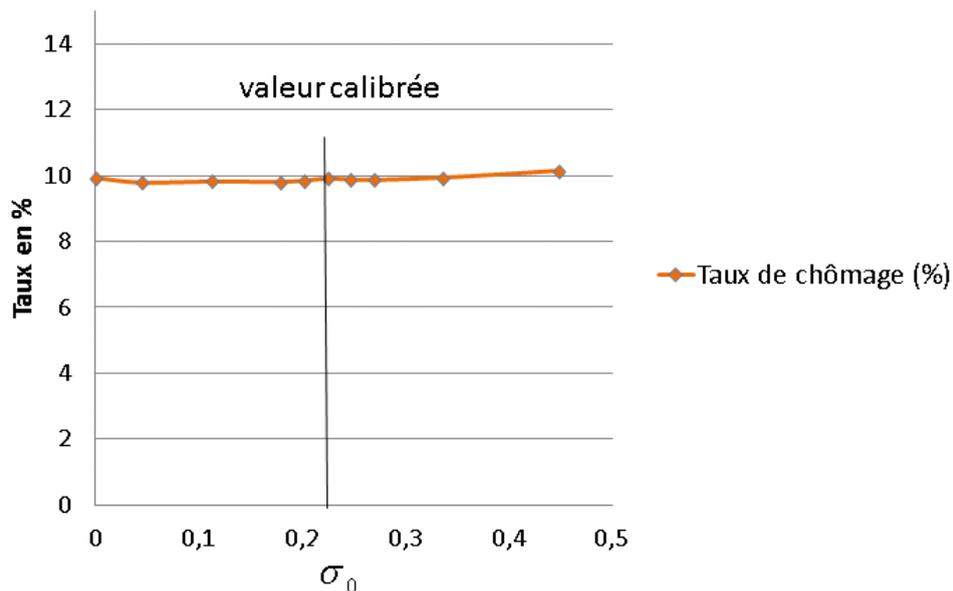


FIGURE 5.12 – Sensibilité au facteur d'incertitude sur la productivité

5.4.2.2 Sensibilité au poids du scénario pessimiste dans l'anticipation de la demande

Nous étudions ici l'impact des facteurs psychologiques qui influencent les comportements des employeurs. Ces facteurs psychologiques sont modélisés avec des poids que l'employeur accorde aux différents scénarios de la demande (cf. équation 24 de l'annexe C). Nous faisons varier le coefficient ω_{-1} du scénario pessimiste, les autres coefficients restent à leurs valeurs calibrées et donc les trois valeurs sont renormalisées de telle manière que leur somme fasse 1.

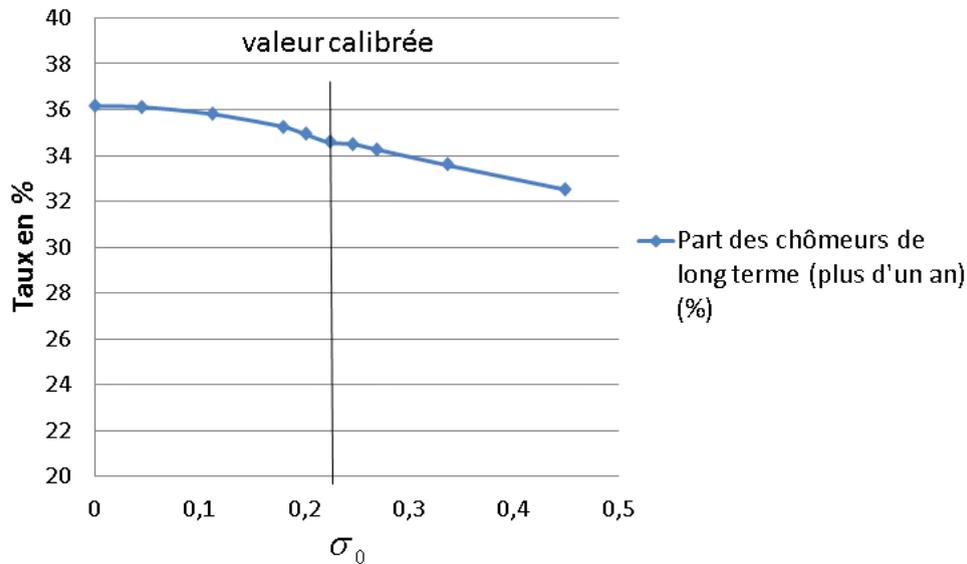


FIGURE 5.13 – Sensibilité au facteur d’incertitude sur la productivité

Le scénario pessimiste a un impact très important sur le taux de chômage comme nous le voyons sur la figure 5.15. Quand ω_{-1} augmente, les employeurs commencent à prendre plus en compte le risque d’un futur licenciement au moment de la création d’un nouveau contrat et réduisent leurs embauches en CDI au profit d’embauches en CDD (figure 5.16). Les employeurs recrutent de plus en plus aussi sur des CDD courts d’une semaine (cf. 5.17) car ceux-ci sont les contrats les moins risqués en cas de baisse anticipée de la demande. La valeur calibrée du paramètre ω_{-1} est de 78.9%. Elle correspond à un taux de chômage élevé. Il apparaît qu’une réduction de ce paramètre aurait un impact très fort sur le chômage. si le paramètre ω_{-1} est à 0, c’est à dire si les employeurs ne prennent pas en compte le scénario pessimiste d’évolution de la demande, le taux de chômage tombe à 5.13%. *Ceci souligne l’importance de prendre en compte les facteurs psychologiques qui déterminent les comportements des employeurs dans un modèle économique.* Ceux-ci ont un impact fort sur le choix des contrats CDD et CDI et donc sur le fonctionnement du marché du travail. Une solution pour réduire le chômage et faciliter l’embauche en CDI peut être donc de réduire les incertitudes liées à un licenciement économique. Nous effectuerons des variantes sur les licenciements économiques dans le chapitre 6.

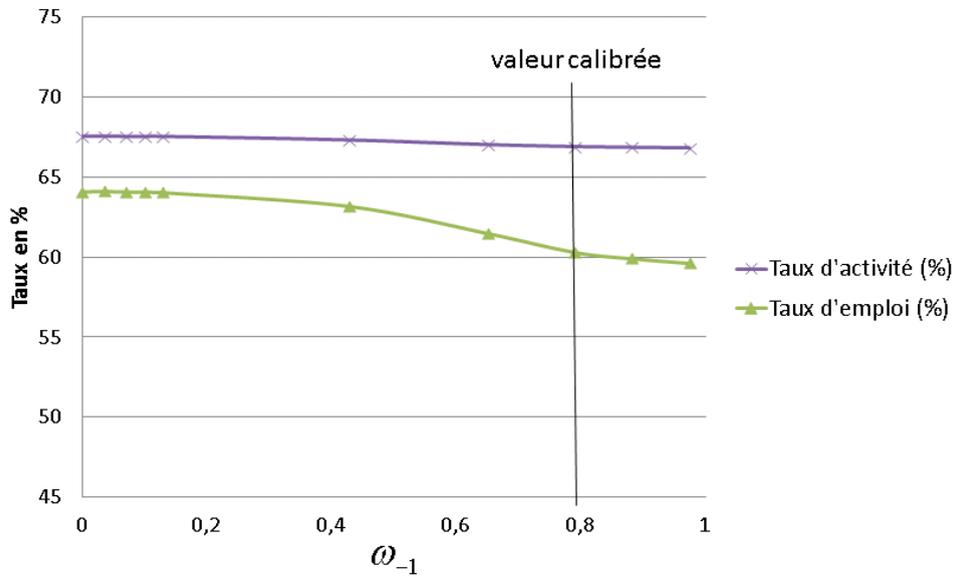


FIGURE 5.14 – Sensibilité au poids du scénario pessimiste dans l'évaluation des firmes

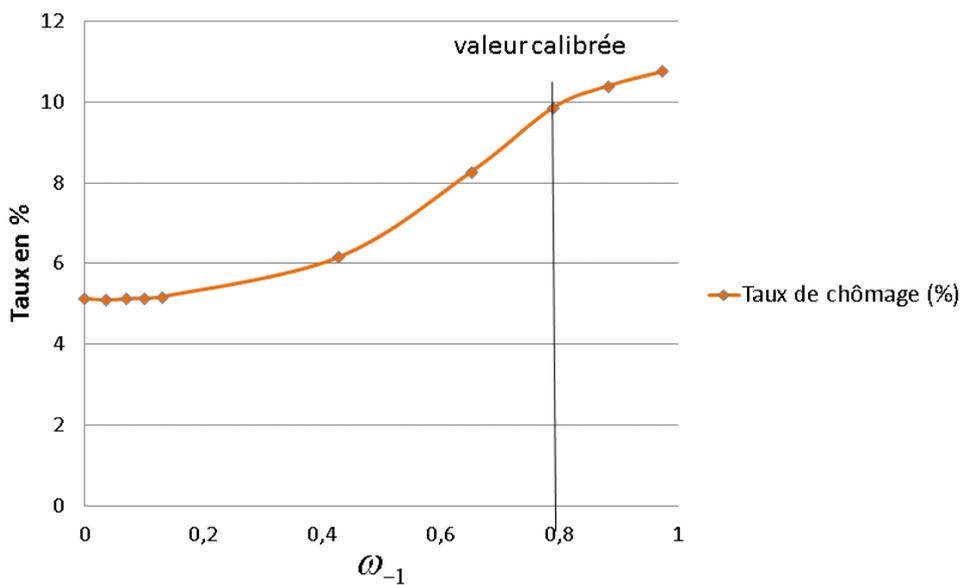


FIGURE 5.15 – Sensibilité au poids du scénario pessimiste dans l'évaluation des firmes

Nous avons fait varier le poids du scénario optimiste dans le processus d'évaluation de la firme et nous obtenons des résultats symétriques.

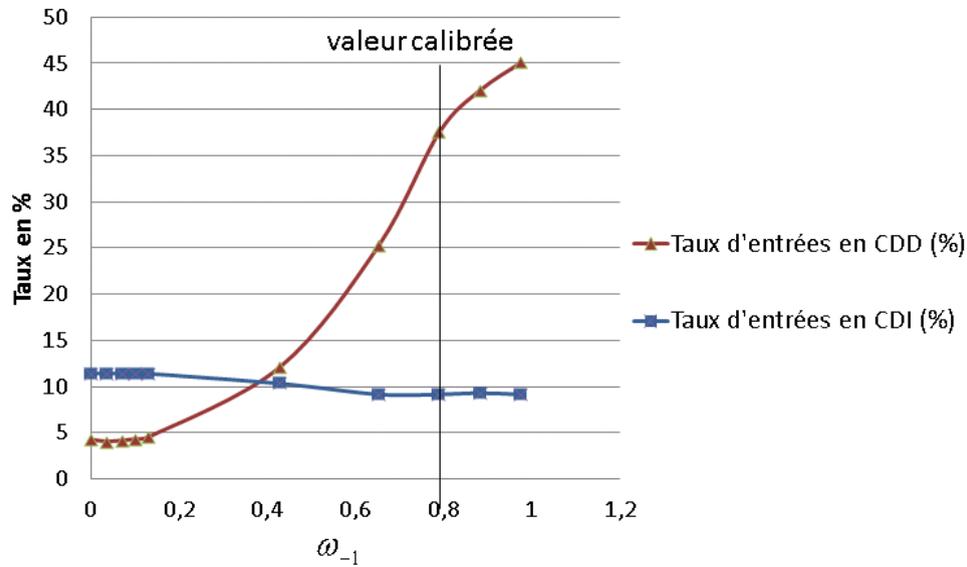


FIGURE 5.16 – Sensibilité au poids du scénario pessimiste dans l'évaluation des firmes

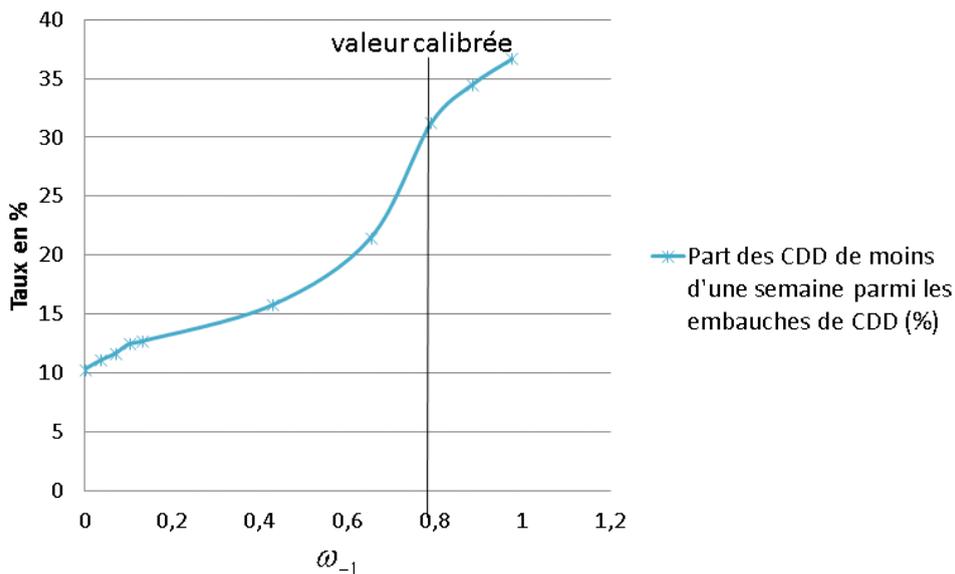


FIGURE 5.17 – Sensibilité au poids du scénario pessimiste dans l'évaluation des firmes

5.4.2.3 Sensibilité aux coûts de formation spécifique

Nous analysons ici la sensibilité au paramètre PTr^{spec} qui intervient dans l'équation (cf. équation 14) et qui détermine le coût de la formation pour donner une unité de capital humain spécifique à un employé.

Ces coûts de formation spécifiques doivent obligatoirement être payés pour embaucher un individu sur un nouvel emploi, car les travailleurs n'ont jamais le capital humain spécifique

requis pour le poste. Ce coût ne dépend pas des caractéristiques de l'individu embauché et il n'y a donc pas d'effet de sélection induit par une variation de ce coût de formation spécifique.

La figure 5.18 montre qu'une augmentation de coût moyen de formation spécifique décroît le taux d'entrée en CDD au profit de l'entrée en CDI, et cet effet est particulièrement fort pour les embauches en CDD d'une semaine (cf. figure 5.19). Il devient en effet moins rentable pour l'employeur d'embaucher avec des contrats courts, car il est plus difficile d'amortir les coûts de formation payés à l'embauche.

Les recrutements de CDD et particulièrement de contrats courts d'une semaine ne tombent pas à 0 pour deux raisons :

- tout d'abord parce qu'une partie des postes ont des capitaux humains spécifiques requis très proches de 0 (cf. section 2.3.3.1), ce qui entraîne des coûts de formation spécifiques qui restent faibles pour une partie des embauches alors même que le coût moyen augmente.
- ensuite une partie des firmes a recours à des CDD d'usage pour lesquels il n'y a pas de formation requise (cf. section 2.4.1.1).

On constate que l'effet sur le chômage de ce changement de coût spécifique est proche de zéro (cf. figure 5.20). Ceci s'explique par deux effets qui vont dans des sens contraires : quand les coûts de formations spécifiques augmentent, il y a plus d'embauches en CDI et moins d'embauches en CDD, ce qui a une effet positif sur le chômage, mais parallèlement, l'augmentation des coûts des formation à l'embauche pénalise globalement les entrées en emploi.

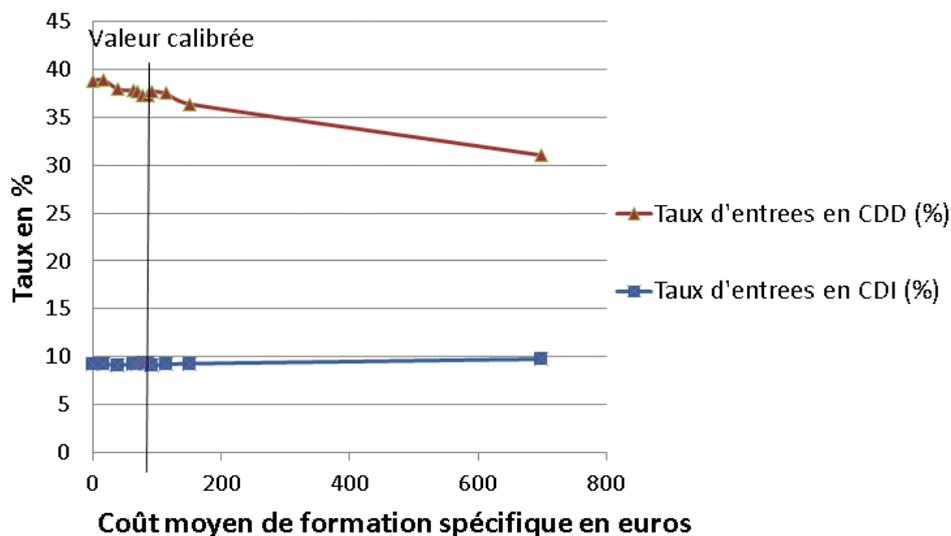


FIGURE 5.18 – Sensibilité au coûts de formation spécifique

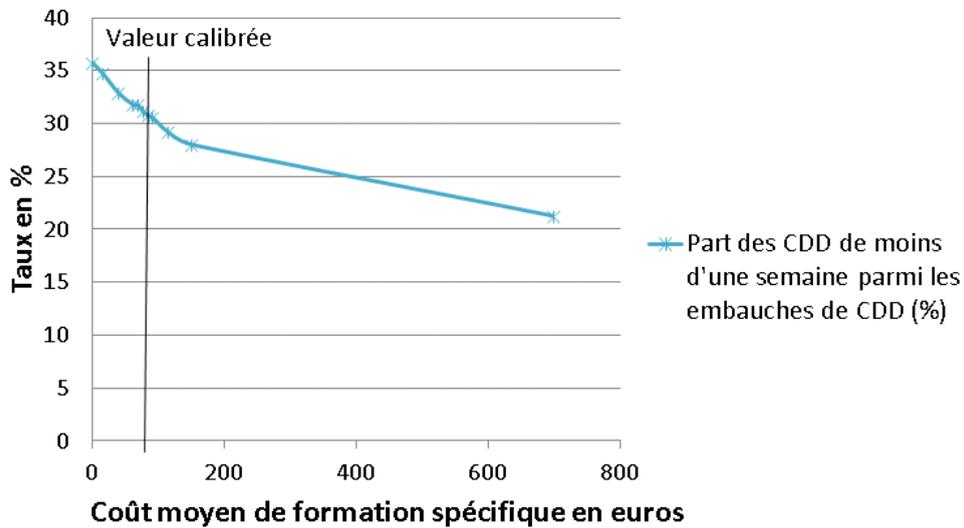


FIGURE 5.19 – Sensibilité au coûts de formation spécifique

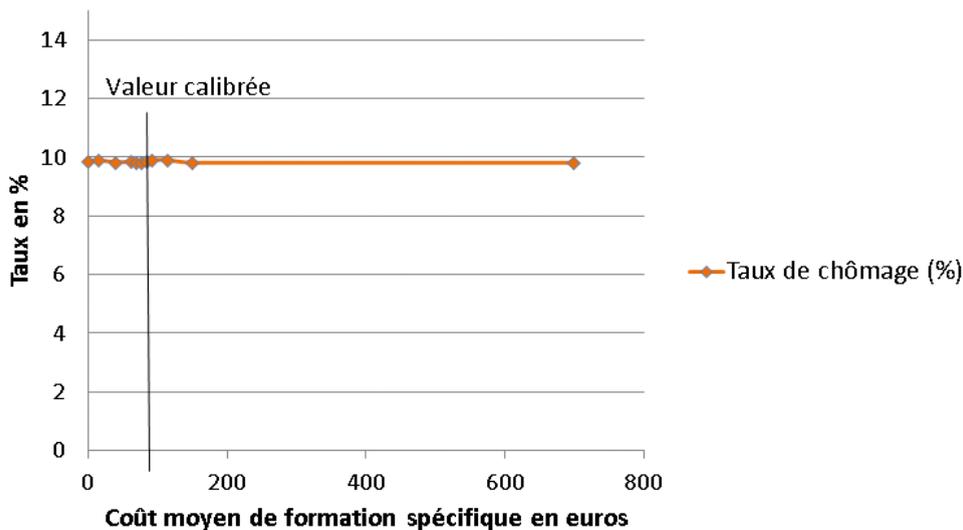


FIGURE 5.20 – Sensibilité au coûts de formation spécifique

5.4.3 Réponse du modèle à des chocs agrégés

Dans cette section, nous proposons d'étudier des effets macroéconomiques sur le modèle.

5.4.3.1 Part de la production de base en valeur retenue par la firme

La part de la production de base en valeur retenue par la firme ζ détermine la part nette accordée au travailleur $1 - \zeta$, et plus précisément le salaire net réel des individus (cf. équation 2.26). Comme ζ est identique pour toutes les entreprises, un changement de ce paramètre

représente un changement du rapport de force dans la négociation salariale entre la firme et le travailleur. Les résultats sont présentés sur la figure 5.21. Nous observons une courbe en cloche pour le taux d'emploi qui est à son maximum pour une valeur de ζ de 0.78.

Si le paramètre ζ est fixé à une valeur inférieure à 0.78, le taux d'emploi diminue car les firmes créent moins d'emplois. Les postes ont en effet moins de chance d'être profitables. Si ζ augmente au dessus de 0.78, les salaires proposés aux individus décroissent (cf. figure 5.22) et les emplois deviennent moins attractifs, ce qui résulte en une diminution du taux d'activité et du taux d'emploi comme on le voit sur la figure 5.21. Le taux de chômage diminue légèrement, non pas à cause de la création d'emploi mais par un effet de découragement des chômeurs. Quand ζ est proche de 1, les salaires devraient tendre vers 0, car la firme retient théoriquement 100% de la valeur de la production, mais cet effet est limité par la présence du SMIC égal à 1072 euros en France comme on le voit sur la figure 5.22, ce qui limite les effets de découragement des individus et la baisse du taux d'emploi.

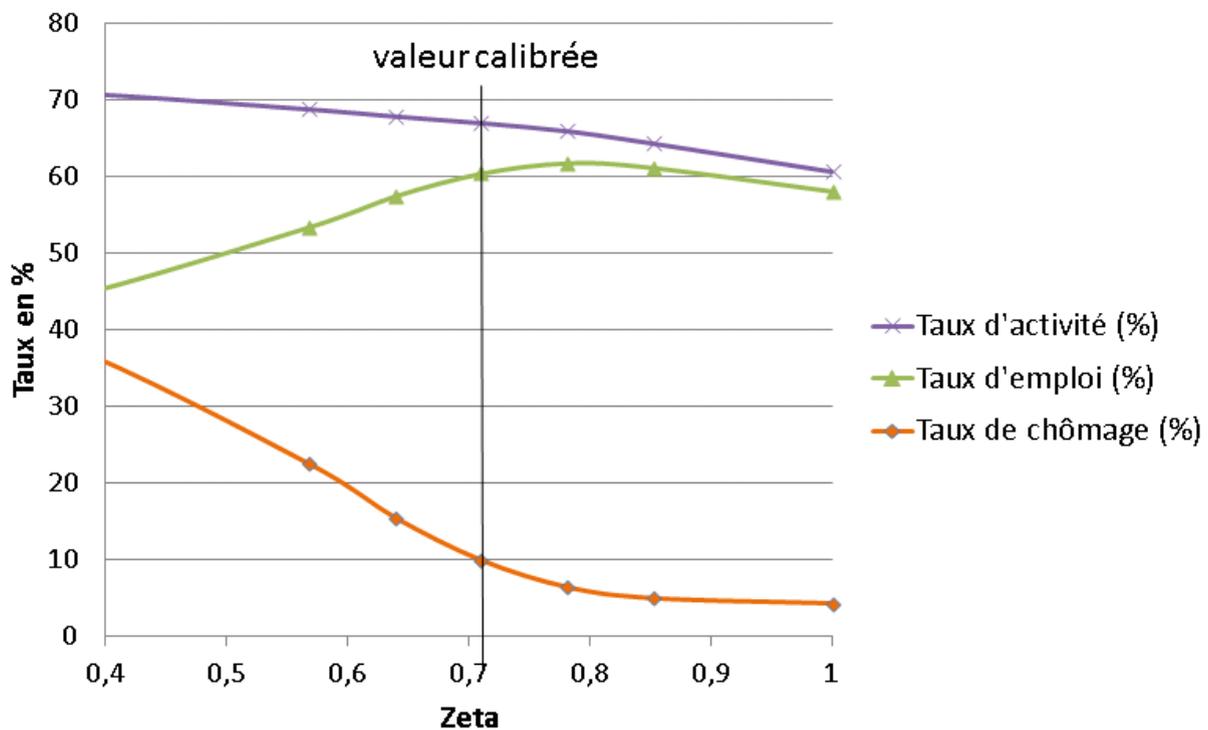
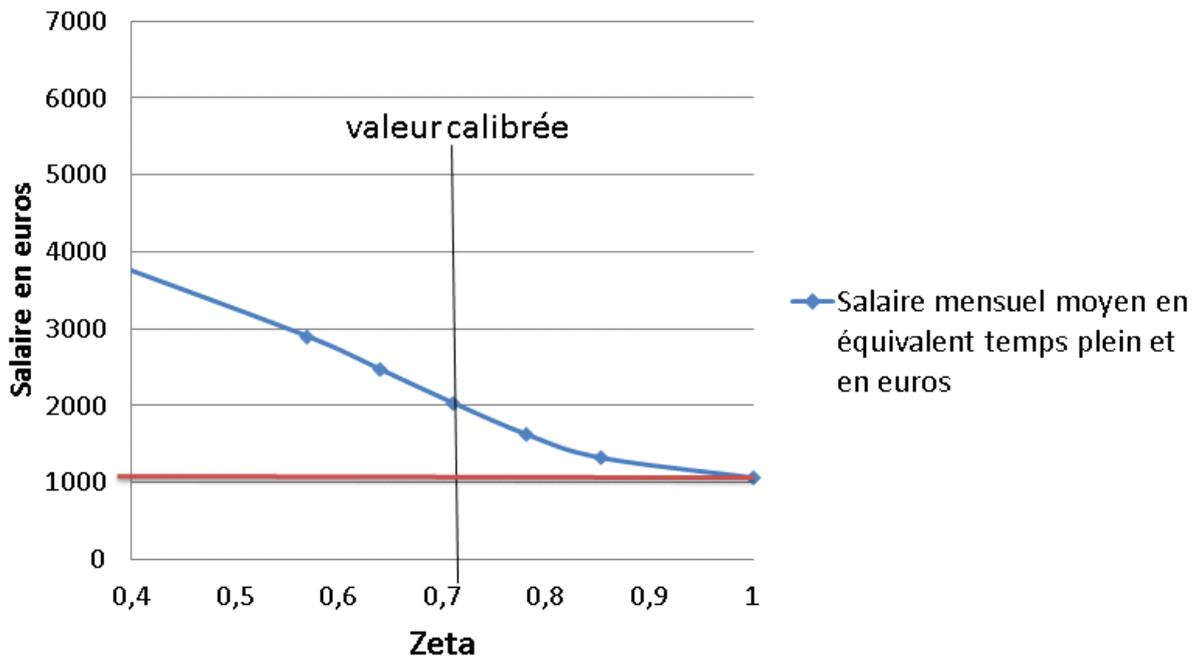


FIGURE 5.21 – Sensibilité à la part de la production en valeur ζ

FIGURE 5.22 – Sensibilité à la part de la production en valeur ζ

5.4.3.2 Choc de demande

Nous étudions ici un choc macroéconomique sur notre économie, avec l'impact d'un changement de demande globale D_{tot} qui est répartie entre les firmes (cf. section 2.3.2.2). Pour réaliser cette expérience, nous multiplions D_{tot} par un facteur entre 0.5 et 2 et nous observons la réponse du modèle après 104 périodes (2 ans) à partir de la sauvegarde du modèle.

Si le choc de demande est négatif (facteur multiplicatif inférieur à 1), le taux de chômage augmente rapidement, ce qui met en évidence un chômage par manque de demande. Quand le facteur de demande augmente au-dessus de 1 (choc de demande positif), le taux de chômage décroît, mais il ne tombe pas à 0, alors que les emplois vacants deviennent très nombreux (cf figure 5.4.3.3¹

Comme dans la réalité, il existe donc un chômage frictionnel persistant lié au processus d'appariement entre les travailleurs et les employeurs sur le marché du travail. D'autres facteurs que la demande (des facteurs comportementaux et institutionnels) ont un impact sur le taux de chômage comme les coûts de licenciement, le niveau des allocations chômage, la préférence pour le temps libre, le taux de décroissance de l'utilité de réservation des chômeurs, le niveau du SMIC et les coûts des formations à l'embauche.

Par ailleurs, nous observons qu'une augmentation de la demande réduit le chômage

1. Nous avons aussi calculé la réponse du modèle en multipliant la demande par 5 et par 10 mais nous n'avons pas placé ces points sur le graphique pour ne pas l'alourdir. Le taux de chômage reste bien à cette valeur asymptotique de 6.5% après la valeur de 2 pour le facteur de demande.

mais améliore aussi la qualité des emplois des individus. Il y a moins de précarité car le taux de rotation de la main-d'œuvre sur le marché du travail diminue. En effet, les employeurs substituent les embauches en CDD par des embauches en CDI (cf. figure 5.4.3.3). Le taux d'entrée en CDD prend la forme d'une courbe en cloche, avec un maximum pour le facteur de demande à 0.8. Lorsque nous diminuons la demande les employeurs remplacent les CDI par des CDD, ce qui augmente le taux d'entrée en CDD, mais quand la demande diminue beaucoup, ils finissent par ne plus embaucher du tout et le taux d'entrée en CDD diminue aussi.

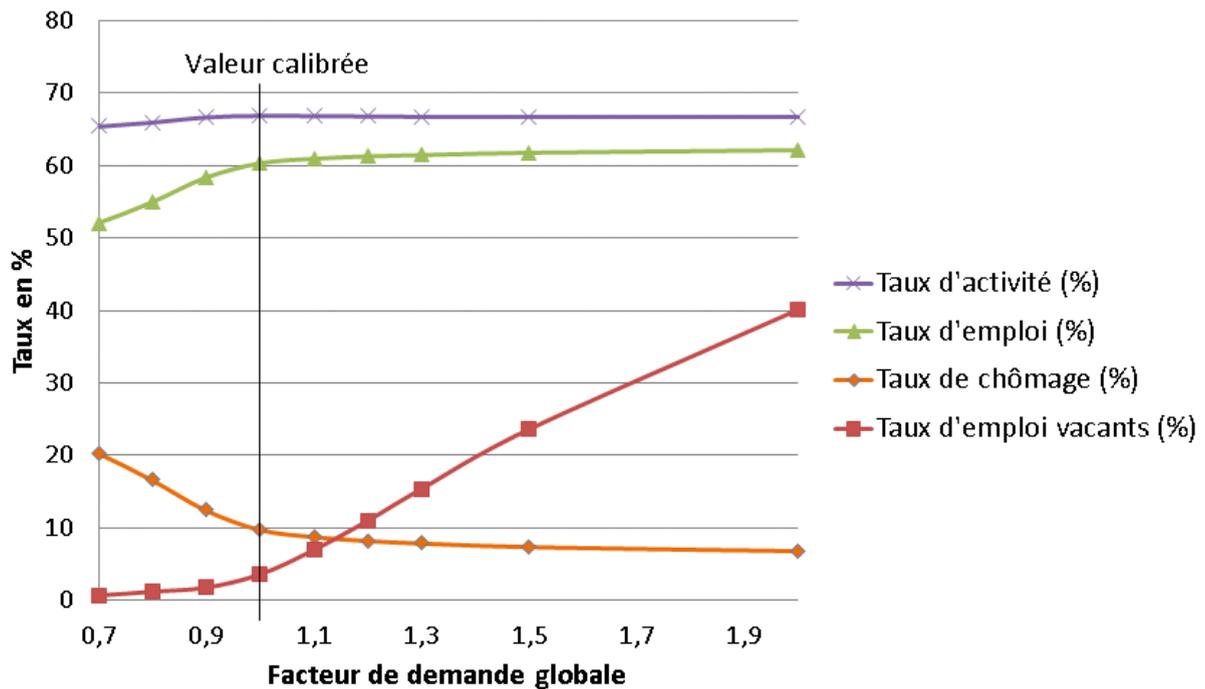


FIGURE 5.23 – Sorties du modèle après 104 périodes en fonction du facteur de demande globale

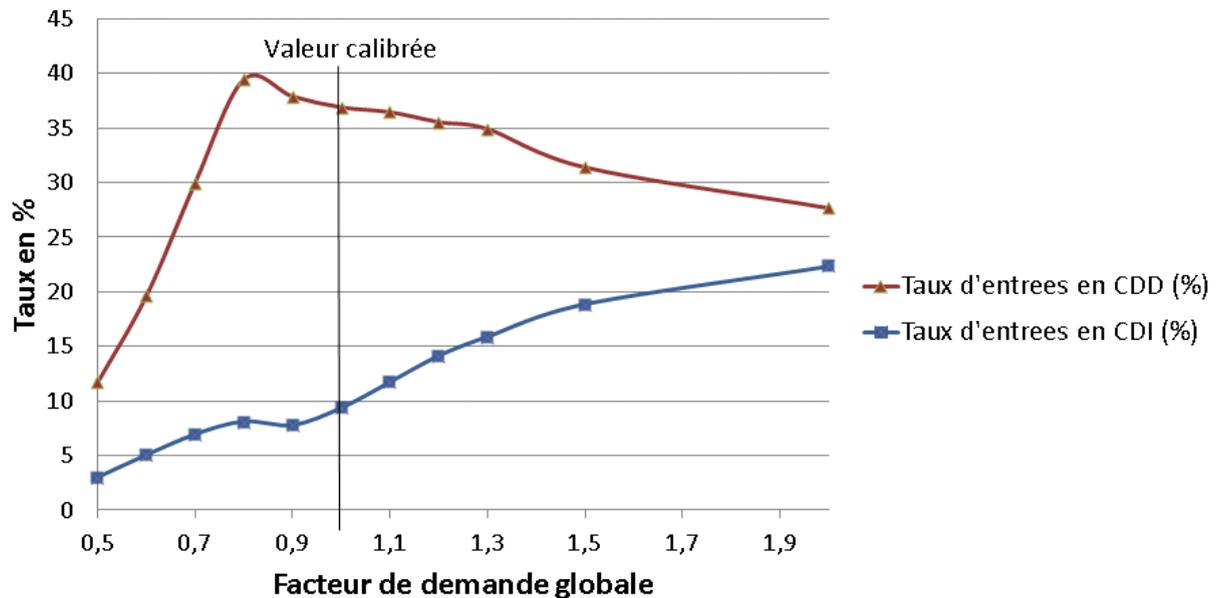


FIGURE 5.24 – Sorties du modèle après 104 périodes en fonction du facteur de demande globale

5.4.3.3 Sensibilité à la volatilité de la demande de chaque entreprise

Nous étudions ici l'impact de la volatilité de la demande pour les entreprises. Nous multiplions le facteur de volatilité de la part de marché de chaque entreprise $\sigma_{MS,j,t}$ par un facteur compris entre 0.5 et 2 et nous observons la réponse du modèle après 104 périodes (2 ans). Plus ce facteur $\sigma_{MS,j,t}$ prend une valeur importante plus la volatilité de la demande individuelle de chaque firme augmente. La demande totale dans l'économie reste cependant constante. C'est simplement la répartition de cette demande globale parmi les entreprises qui change de façon plus brutale (cf. section 2.3.2.2).

Nous observons qu'une augmentation de la volatilité augmente le taux d'entrée en CDD (cf. figure 5.25) et réduit le taux d'entrée en CDI car dans ce contexte plus incertain les employeurs anticipent que la demande fluctue beaucoup (cf. le mécanisme d'anticipation des firmes de la section 2.5.2.4). Il s'adaptent donc en employant des individus en CDD pour ne pas prendre le risque de devoir les licencier.

Cette augmentation du taux d'entrée en CDD augmente le chômage à cause de l'effet de rotation (effet *churning*). Il y a en effet plus d'entrées en emploi sur le marché du travail mais aussi plus de sorties vers le chômage et comme les individus mettent du temps avant de retrouver un emploi, cela accroît le chômage frictionnel (cf. figure 5.26).

Paradoxalement, tandis que le chômage augmente, nous observons une décroissance de la part de chômeurs au chômage depuis plus d'un an, car le taux de rotation augmente sur le marché du travail, ce qui raccourcit la durée de l'emploi, mais aussi du chômage (cf. figure 5.27).

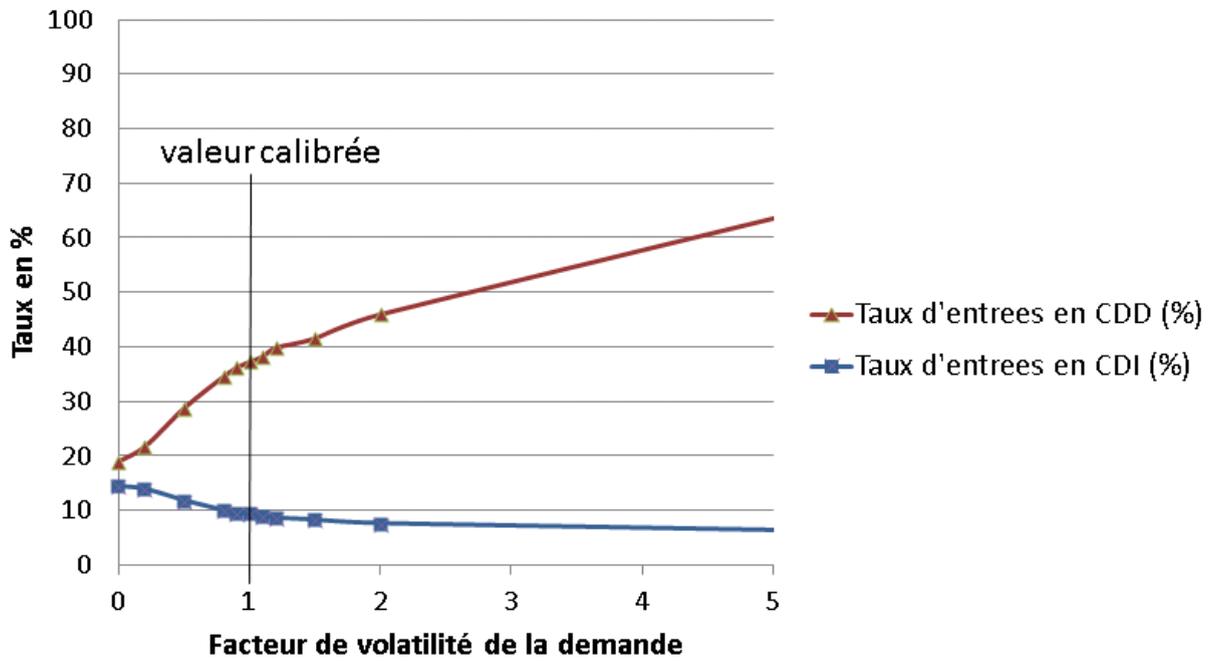


FIGURE 5.25 – Sensibilité au facteur de volatilité de la demande

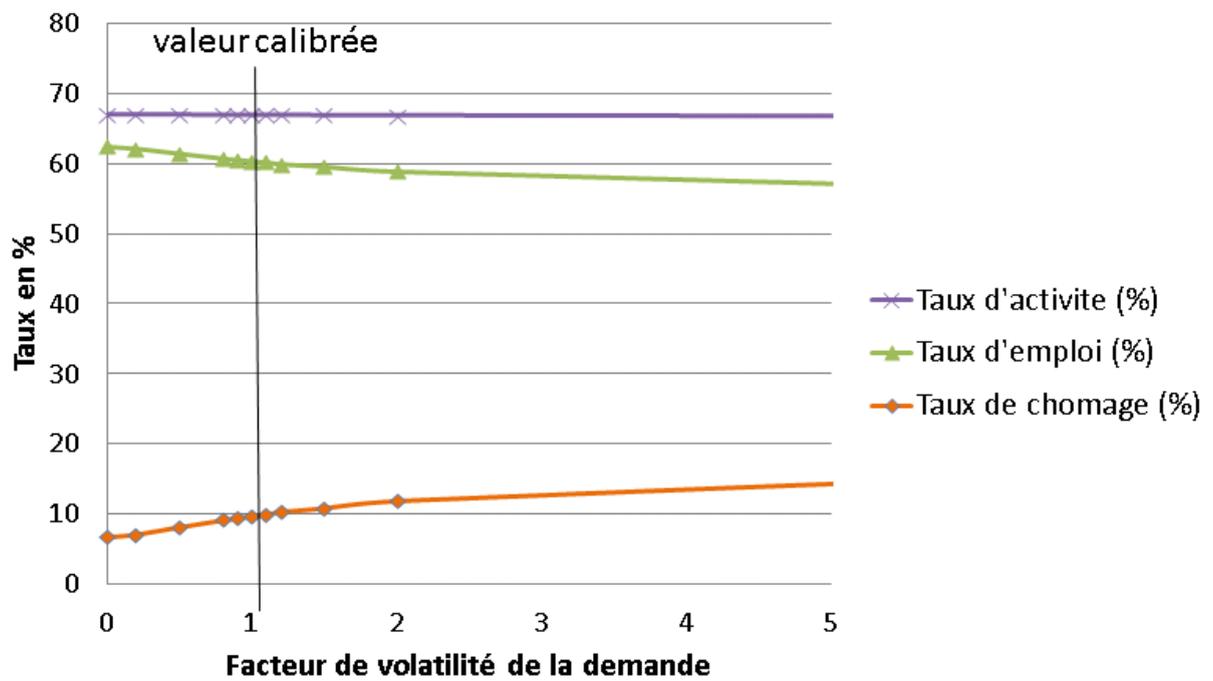


FIGURE 5.26 – Sensibilité au facteur de volatilité de la demande

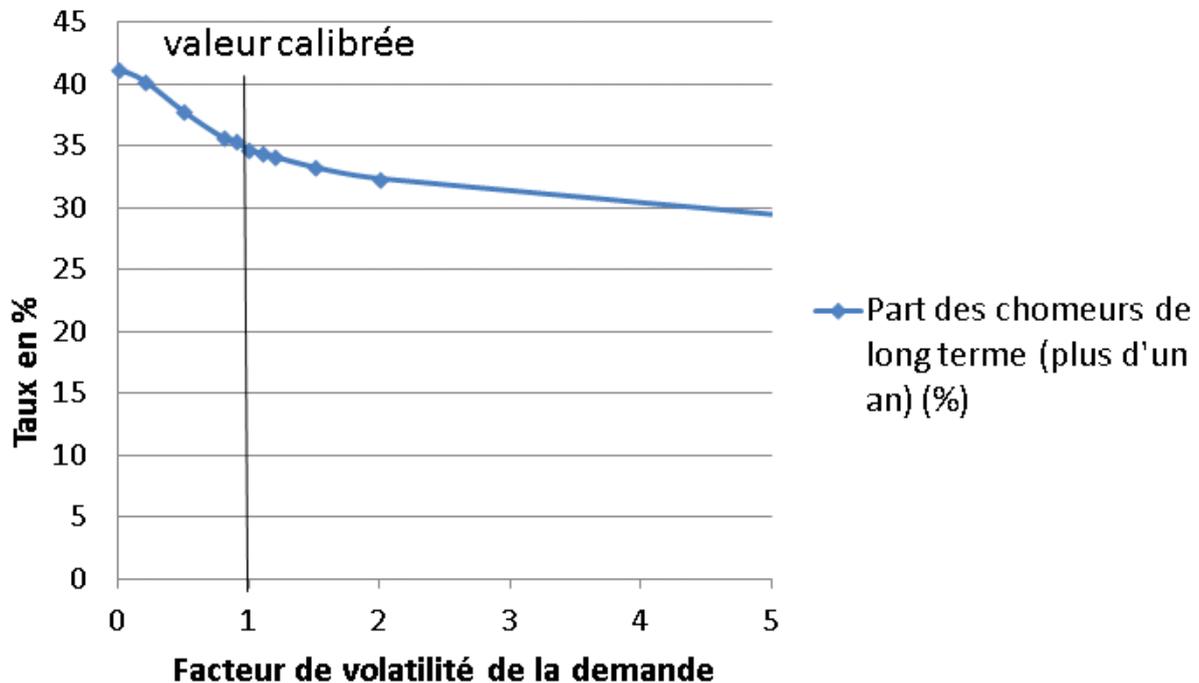


FIGURE 5.27 – Sensibilité au facteur de volatilité de la demande

5.5 Bilan du chapitre

La reproduction des flux sur le marché du travail

Notre modèle WorkSim permet de reproduire un grand nombre de cibles du marché du travail avec une précision acceptable. Il reproduit bien et parfois très bien la dynamique des flux bruts sur le marché du travail par âge et par niveau de qualification, qui ont été mesurés par diverses sources statistiques (Déclaration des mouvements de main-d'œuvre, Enquête Emploi). Ces données sont largement utilisées dans les analyses et les débats sur le marché du travail. L'avantage de notre approche est que tous ces flux émergent à partir des décisions rationnelles des agents, firmes et individus. De plus, la plupart ne sont pas des cibles de la calibration, ce qui montre la pertinence de notre modèle.

La segmentation du marché du travail

Nos analyses suggèrent une segmentation (ou dualisme) forte entre les travailleurs sur le marché du travail français. Une partie des travailleurs ont des situations stables en CDI car les taux de licenciement sont faibles, tandis que d'autres alternent entre des épisodes de chômage et de CDD. Ceci est un fait stylisé important du marché du travail français. Nous montrons que ce dualisme persiste entre la catégorie d'âge 15-24 ans et la catégorie des 25-49 ans. Il semble donc qu'une partie des individus n'arrive pas à s'intégrer en CDI et que la segmentation est donc durable. Cette conjecture devrait cependant être confirmée par une

analyse longitudinale des trajectoires de carrières des individus. On pourrait ainsi préciser pour qui (et avec quelle intensité) les CDD sont des trappes à précarité et pour qui ils sont des tremplins.

Les analyses de sensibilité des paramètres comportementaux des agents

Nous avons effectué des variantes des paramètres comportementaux des agents et des variantes macroéconomiques. Ces variantes permettent de comprendre les mécanismes micro-économiques sous-jacents sur le marché du travail qui ont une influence sur les variables agrégées du modèle, comme le taux de chômage. Les résultats sont parfois inattendus *a priori* car ils émergent d'interactions complexes. Par exemple, la part de la production en valeur retenue par la firme ζ a un effet non monotone sur le taux d'emploi.

Nous montrons aussi l'influence de paramètres importants dans le choix des contrats CDD et CDI par les employeurs. Le poids du scénario pessimiste dans l'évaluation de la demande a un impact fort sur le chômage. Ceci souligne l'importance de facteurs psychologiques qui déterminent les comportements des employeurs. Ce sont des déterminants importants du fonctionnement du marché du travail. Nous montrons qu'il est donc très important de les prendre en compte dans un modèle économique, comme l'a souligné le prix Nobel (Akerlof *et al.*, 2009).

Chapitre 6

Évaluation de politiques publiques

Le calibrage du modèle présenté dans le chapitre 4 a permis de reproduire correctement les principaux flux et stocks observés, ainsi que les caractéristiques importantes du marché français, comme le dualisme. Nous allons maintenant illustrer les possibilités pour le modèle WorkSim de modéliser des politiques de l'emploi et d'en étudier les impacts. L'évaluation d'une politique de l'emploi consiste à modifier un ou plusieurs éléments du cadre institutionnel du modèle, à lancer une simulation sur une plage temporelle et à comparer les sorties de cette simulation avec la simulation de référence. Les paramètres du modèle restent à leurs valeurs calibrées (cf. section 4.2).

Nous présenterons tout d'abord une évaluation du contrat de génération effectuée avec une version antérieure du modèle. Ensuite nous détaillerons d'autres variantes de politique économique avec la nouvelle version du modèle présentée dans le chapitre 2 suivant trois principaux axes :

- un premier axe sur l'évaluation du dispositif d'allègements de charge avec des variantes de ciblage de ces baisses de cotisations sociales sur les bas ou moyens salaires.
- un deuxième axe sur la réduction du temps de travail avec des variantes sur le maintien ou non des salaires
- un troisième et principal axe sur les politiques de protection de l'emploi et les caractéristiques juridiques des contrats avec :
 - la suppression des CDD
 - la possibilité de renouveler deux fois les CDD
 - la sensibilité aux coûts de licenciement du CDI
 - la suppression de la contrainte légale pour licencier un employé en CDI

6.1 Le contrat de génération

Dans un article à paraître dans la *Revue Économique*, nous avons effectué une étude *ex ante* du contrat de génération (CG) avec une première version du modèle¹.

1. Cette première version du modèle est moins développée du côté des entreprises, notamment sur le choix des contrats et sur l'anticipation de la demande. Le choix de créer un contrat CDD ou CDI n'est pas complètement endogène. Lorsque

Le contrat de génération créé par la Loi n°2013-185 du 1er mars 2013 a été présenté comme une mesure phare contre le chômage. Le CG est un contrat de type CDI mais subventionné par l'État. L'employeur reçoit une prime de 4000 euros par an jusqu'à 3 ans s'il recrute un jeune au chômage ou en CDD et maintient un senior en emploi (des éléments subsidiaires sont présentés dans l'annexe I). Nous avons choisi d'évaluer le CG car il s'agit d'un outil nouveau parmi les politiques de l'emploi, et que notre technique de modélisation permet précisément d'en saisir les éléments complexes au niveau micro-économique. Notamment le contrat de génération prévoit un tutorat, c'est -à-dire la transmission de capital humain du senior au junior, ce que nous pouvons prendre en compte dans WorkSim. De plus le modèle permet une analyse longitudinale des effets sur des cohortes bénéficiant ou non de ce CG, ainsi que d'évaluer les effets d'éviction.

Le CG a été voté en Mars 2013, pour une durée de 5 ans, avec une mise en place très progressive du dispositif pour les entreprises de plus de 50 salariés. Nous avons analysé le contrat de génération dans le courant de l'année 2013, il s'agissait donc d'une analyse *ex-ante* des effets à attendre de la loi initiale sur une telle durée.

Faute de place, cette étude du contrat de génération est présentée dans l'annexe I. Néanmoins, nous résumons ici les principaux résultats que nous avons obtenus. Nous montrons un effet de diminution du chômage des jeunes et des seniors. Toutefois cet effet est faible pour les jeunes (de l'ordre de 0,38 points de chômage), et encore plus faible pour les seniors (avec 0,03 points). Ces résultats n'avaient pas fait l'objet d'une prédiction dans l'étude d'impact (Assemblée-Nationale, 2012) qui avait mené à sa mise en place, mais l'ambition de la loi laissait présager un effet substantiel.

Ceci s'explique par deux raisons :

- tout d'abord, nous montrons qu'il y a un fort effet d'aubaine pour les entreprises, ce qui ne semblait pas avoir été envisagé. Nous calculons pour l'embauche des jeunes, un effet d'aubaine de l'ordre de 90%.
- ensuite nous montrons que la durée effective des contrats simulée par WorkSim serait d'environ de 17.5 mois, soit une durée beaucoup plus courte que celle prévue par l'étude d'impact (Assemblée-Nationale, 2012) qui est de deux ans et demi. En effet, nous mettons en évidence que les contrats de générations peuvent se terminer prématurément par exemple à cause de licenciements ou de démissions. Excepté la perte de la prime du CG de 4000 euros par an, rien n'empêche l'une des deux parties à mettre fin au contrat avant son terme

Le contrat de génération a néanmoins des apports positifs. Nous montrons par une analyse de cohorte que le CG améliore durablement le parcours professionnel de ceux qui en bénéficient, non seulement pour trouver un emploi mais aussi pour obtenir un emploi plus stable (plus de CDI et moins de CDD), ce qui était l'ambition première du programme. En

l'entreprise envisage de créer un nouveau poste à pourvoir, le type de contrat CDD ou CDI est déterminé de manière aléatoire selon des probabilités identiques pour toutes les firmes. Ensuite, pour que le poste soit définitivement créé avec le contrat déterminé aléatoirement, l'entreprise estime son profit attendu par période, à partir d'une évaluation coût-bénéfice qui inclut la productivité de l'employé, le coût salarial et le coût éventuel de rupture du contrat qui diffère selon son type. Ainsi dans cette version, les coûts des contrats sont certes pris en compte mais pas les principaux déterminants du choix du contrat, comme les coûts de formation et l'anticipation de la demande future.

outre, le coût total demeure proche du coût anticipé, et surtout le coût brut par chômeur évité (18 925 euros) est inférieur au coût des systèmes d'allègements de charge, qu'ils soient calculés dans le modèle ou par d'autres méthodes.

Mais notre protocole permet aussi de montrer qu'un effet d'éviction touche les jeunes non bénéficiaires du CG ainsi que les adultes.

Nous avons évalué de nombreuses variantes pour voir s'il était possible d'améliorer le CG. Celles que nous avons explorées nous apportent une réponse négative :

- le recentrage sur les catégories de jeunes les plus vulnérables (chômeurs de plus de 6 mois par exemple) montre que les entreprises sont plus réticentes à embaucher ces jeunes en CDI et plus promptes à les licencier. L'effet de la mesure n'est pas amélioré.
- le recentrage sur les travailleurs avec un salaire proche du SMIC entraîne de forts effets d'éviction sur d'autres catégories de main-d'œuvre. Ainsi, il ne valide pas les propositions de réserver les CG aux salaires au dessous de 1,6 fois le SMIC (Cahuc *et al.*, 2013).

L'impact sur le chômage de cette mesure étant faible, nous avons choisi de ne pas analyser à nouveau cette politique de l'emploi avec le nouveau modèle.

6.2 Évaluations de politiques publiques avec le nouveau modèle

Nous présentons maintenant des évaluations d'autres politiques publiques que nous avons menées avec le nouveau modèle. A chaque fois, nous avons évalué ces politiques suivant 5 différents groupes d'indicateurs de façon à montrer les effets contraires qu'il peut y avoir sur les entreprises, ainsi que sur les différentes catégories de main-d'œuvre. Nous effectuerons aussi un bilan de chacune de ces politiques économique en terme de coût. Nous verrons qu'il est difficile de trouver une mesure qui est positive pour tous ces indicateurs. L'application d'une politique aboutit généralement à un nouveau compromis par rapport à la situation de référence.

1. une première série d'indicateurs porte sur l'effet général de la mesure :
 - le taux de chômage par âge et par niveau de qualification
 - le taux d'activité
 - le taux d'emploi
 - le nombre d'emplois créés à l'échelle réelle
 - le nombre de chômeurs évités à l'échelle réelle
2. une série d'indicateurs permet de mesurer les avantages du côté des individus :
 - le salaire net mensuel moyen en équivalent temps plein (EQTP) et en euros
 - le revenu moyen des ménages par unité de consommation
 - l'utilité moyenne des individus qui ne sont pas dans les états d'étudiant, de fonctionnaire ni de dirigeant (les individus dans ces états ne calculent pas de fonction d'utilité)
3. une série d'indicateurs permet de mesurer les avantages du côté des entreprises :

- le revenu moyen des firmes sur l'année
 - le coût salarial moyen sur l'année
 - le bénéfice moyen sur l'année
4. une série d'indicateurs plus spécifiques sur le chômage de long terme et la précarité :
- la part de chômeur de long terme (plus d'un an)
 - la part d'emploi à temps partiel
 - le taux de rotation de la main-d'œuvre
 - le nombre moyen d'épisodes de CDD dans l'année pour les individus ayant connu au moins un épisode de CDD dans l'année
 - la probabilité pour un individu en emploi de connaître au moins un épisode de chômage dans l'année suivante
5. des indicateurs sur le coût de la mesure :
- le coût global de la mesure
 - le coût brut par emploi créé
 - le coût brut par chômeur évité

6.2.1 Effets des politiques d'allègements de charges patronales

Le modèle WorkSim prend en compte le dispositif d'allègements de charges patronales sur les bas et moyens salaires, dispositif dit réduction "Fillon". Le calcul des charges patronales est présenté dans l'annexe A.

Nous rappelons les éléments de ce dispositif. Les salaires versés inférieurs à 1,6 fois le SMIC ouvrent droit à un allègement des cotisations patronales qui dépend de la taille de l'entreprise. Dans les entreprises de 20 salariés et plus, l'employeur bénéficie d'un allègement des cotisations patronales égal, au maximum, à 26% du salaire brut. L'allègement devient nul à partir de 1,6 SMIC calculé pour un an. Dans les entreprises de moins de 20 salariés, l'employeur bénéficie d'un allègement des cotisations patronales égal, au maximum, à 28.1% du salaire brut.

Nous avons évalué les effets de ce dispositif en comparant les valeurs de nos indicateurs avec puis sans allègement de charges. La situation avec allègement de charges correspond à la simulation de référence avec le modèle calibré (cf. chapitre 5). La situation sans allègement de charges correspond à une variante que nous évaluons à partir de la simulation de référence. Les résultats sont mesurés 2 ans après la sauvegarde du modèle stabilisé et sont des moyennes pour 200 simulations. Ils sont présentés sur le tableau 6.1.

Nous voyons tout d'abord un apport bénéfique de ce dispositif, car sans ces réductions de cotisations patronales, le taux de chômage serait plus haut de 0.72 points. On observe que les effets de cette mesure sont principalement concentrés sur les jeunes de moins de 25 ans et sur la catégorie socioprofessionnelle des employés/ouvriers car ce sont les catégories de travailleurs avec les plus bas salaires. Nous mesurons un nombre d'emplois sauvegardés avec ce dispositif de 233 000. Nous remarquons que le nombre de chômeurs évités de 192

Indicateurs	Avec allègements	Sans allègements	Impact
Taux de chômage (%)	9.78	10.5	+0.72**
Taux de chômage 15-24 ans (%)	20.88	23.42	+2.54**
Taux de chômage 25-49 ans (%)	8.4	8.98	+0.58**
Taux de chômage 50-64 ans (%)	6.84	6.81	-0.03
Taux de chômage Employés/Ouvriers (%)	10.84	11.57	+0.73**
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	6.71	6.99	+0.28**
Taux de chômage Cadres (%)	4.64	4.73	+0.09**
Taux d'activité (%)	66.93	66.83	-0.10**
Taux d'emploi (%)	60.38	59.81	-0.57**
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	24 629	24 396	-233**
Nombre de chômeurs total (en milliers)	2 672	2 864	+192**
Salaires net mensuel moyen EQTP en euros	2036	2045	+9**
Revenu moyen par unité de consommation en euros	1392	1387	-4.76**
Utilité moyenne des individus	196.3	195.2	-1.12**
Revenu de l'entreprise moyen sur l'année en milliers d'euros	394	392	-1.8**
Coût moyen des salaires (sans les coûts annexes) en milliers d'euros	200	206	5.9**
Bénéfice moyen sur l'année en milliers d'euros	189	181	-7.6**
Taux de chômage de long terme (%)	34.6	35.9	+1.01**
Part d'emploi à temps partiel	21.07	21.56	+0.49**
Taux de rotation (%)	45.26	45.68	+0.42**
Nombre d'épisodes de CDD moyen	1.97	1.96	0
Coût des allègements de charge par an (en milliards d'euros)	25.8	0	-25.8
Nombre d'emplois créés (en milliers)	233	-	-
Coût brut par emploi créé	110 729	-	-
Nombre de chômeurs évités (en milliers)	192	-	-
Coût brut par chômeur évité	134 375	-	-

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 6.1 – Effet de la suppression des allègements de charges

000 est moins élevé. L'écart entre le nombre d'emplois créés et le nombre de chômeurs évités s'explique par une augmentation du taux d'activité de 0.10 points avec la mesure. L'amélioration de la situation de l'emploi réduit le phénomène de découragement des chômeurs. Parallèlement, on observe que les allègements de charge diminuent la part d'emplois à temps partiel (-0.49 points), et donc augmente la part d'emplois à temps plein, ce qui s'ajoute au bénéfice en terme d'emplois créés.

D'un point de vue global, la mesure est positive pour les individus comme pour les entreprises. Pour les individus, elle entraîne une augmentation légère mais significative de leur

utilité (+0.6%). Pour les entreprises, le dispositif permet d'améliorer leurs bénéfices de 8000 euros en moyenne par an (+4.4%). Toutefois, pour ces dernières, on remarque que cette amélioration est moins due à une augmentation du revenu de l'entreprise (de +2000 euros) qu'à une baisse du coût des salaires (de -6000 euros) imputable naturellement aux baisses de charges. Ceci met en évidence un effet d'aubaine pour les entreprises qui réduisent leur masse salariale sans pour autant beaucoup plus embaucher.

Le coût global de ce dispositif s'élève à 25.8 milliards par an, ce qui est supérieur aux 19.7 milliards par an estimés par l'ACOSS à partir des cotisations perçues par l'Urssaf (aco, 2012). Cette différence est due aux écarts de distribution de salaire entre notre modèle calibré et les données réelles (cf. Annexe H). Dans notre simulation, nous avons plus de bas salaires, ce qui conduit à des allègements de charges pour un plus grand nombre de travailleurs.

Le coût brut par emploi créé est important, plus de 110 000 euros par emploi créé et par an. Cette mesure ne semble donc pas efficace pour lutter contre le chômage à cause notamment des effets d'aubaines pour les entreprises que nous avons soulignés. A noter que dans la réalité ce nombre d'emplois créés avec ce dispositif pourrait être plus élevé (et donc le coût brut par emploi créé plus bas) car nous ne mesurons pas avec WorkSim les effets indirects de ces baisses de charge sur la compétitivité des entreprises exposées à la concurrence internationale.

Par ailleurs, il semble qu'un meilleur recentrage sur les catégories de main-d'œuvre les plus vulnérables pourraient être pertinent pour améliorer l'efficacité du dispositif et en diminuer ses effets d'aubaine. C'est que nous exposerons dans la section suivante.

6.2.2 Ciblage sur les bas salaires des allègements de charges

Nous avons testé un ciblage de ces allègements de charges sur les bas salaires. Dans le dispositif d'allègements de charges en vigueur en 2011, les salaires versés inférieurs à 1,6 fois le SMIC ouvrent droit à un allègement des cotisations patronales. Nous souhaitons effectuer des variantes de ce barème, avec des allègements de charge uniquement pour les salaires inférieurs à 1.2 SMIC, puis uniquement pour les salaires inférieurs à 1.3 SMIC et enfin uniquement pour les salaires inférieurs à 2.2 SMIC. Pour pouvoir comparer les effets de ces variantes entre elles, nous calculons de nouveaux coefficients d'allègements de façon à conserver environ le même montant global de réduction des cotisations (cf. tableau 6.2).

Niveau maximal de salaire	Coefficient entreprise moins de 20 salariés	Coefficient entreprise plus de 20 salariés
1.2 SMIC	0.473	0.511
1.3 SMIC	0.374	0.405
1.6 SMIC	0.26	0.281
2.2 SMIC	0.187	0.202

TABLE 6.2 – Coefficients d'allègements de charge

Les résultats de ces variantes sont présentés dans le tableau 6.3.

Il apparaît qu'un meilleur ciblage du dispositif réduit légèrement le chômage qui baisse de 0.23 points lorsque les allègements de charge sont concentrés en dessous de 1.2 SMIC. Le

chômage est réduit principalement chez les jeunes (-1.37 points) et les employés/ouvriers (-0.16 points), car ce sont les catégories concernées par ces bas salaires. Ainsi le nombre d'emplois créés augmente et comme le coût de la mesure est maintenu constant, on observe une diminution du coût brut par emploi créé qui passent de 110 729 à 86 138. Ceci rejoint les préconisations faites par (Cahuc et Carcillo, 2014) de concentrer les allègements de charge sur les bas salaires. Les effets que nous mesurons restent cependant modestes, avec seulement 65 000 emplois en plus. Néanmoins ces emplois bénéficient majoritairement aux catégories les plus précaires, les jeunes et les employés/ouvriers, ce qui est un résultat positif.

Indicateurs	1.2 SMIC	1.3 SMIC	1.6 SMIC	2.2 SMIC
Taux de chômage (%)	9.55	9.66	9.78	9.83
Taux de chômage 15-24 ans (%)	19.51	20.03	20.88	21.3
Taux de chômage 25-49 ans (%)	8.32	8.37	8.4	8.42
Taux de chômage 50-64 ans (%)	6.87	6.86	6.84	6.71
Taux de chômage Employés/Ouvriers (%)	10.68	10.76	10.84	10.87
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	6.66	6.68	6.71	6.59
Taux de chômage Cadres (%)	4.73	4.71	4.64	4.61
Taux d'activité (%)	66.94	66.92	66.83	66.92
Taux d'emploi (%)	60.54	60.46	60.38	60.34
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	24 694	24 662	24 629	24 613
Nombre de chômeurs (en milliers)	2 610	2 635	2 672	2 684
Salaire net mensuel moyen EQTP en euros	2030	2033	2036	2038
Coût des allègements de charge en milliards d'euros	25.7	25.1	25.8	26.0
Nombre d'emplois créés	298	266	233	217
Nombre de chômeurs évités	253	228	192	180
Coût brut par emploi créé	86138	94361	110 729	119 816
Coût brut par chômeur évité	101 581	110 088	134 375	144 445

TABLE 6.3 – Variantes des allègements de charge

6.2.3 Réduction du temps de travail

En France, la durée légale pour un emploi à temps plein en 2011 est de 35h. Toutefois, les salariés à temps complet ont déclaré une durée supérieure à cette durée légale avec une durée hebdomadaire moyenne de 39.6 heures (DARES, 2013a). Dans le modèle WorkSim, le temps de travail d'un emploi à temps plein est fixé à cette valeur de 39.6 heures pour tous les individus. Nous voulons mesurer les effets sur le marché du travail d'une **réduction effective** de la durée du temps de travail de 39.6h à 32h pour tous les emplois. Cette mesure n'est pas à comparer directement avec un abaissement de la durée légale maximale de travail, qui serait plus complexe à modéliser. En effet, dans la réalité, les employeurs peuvent toujours demander à leurs salariés d'effectuer des heures supplémentaires au-delà de cette durée légale.

Il s'agit ici d'analyser les conséquences d'une réduction effective du temps de travail sur le chômage, les salaires, ainsi que les avantages et les inconvénients pour les agents du modèle. Il est aussi intéressant de mesurer l'impact sur les comportements des individus avec notre modèle, car une réduction du temps de travail entre en compte dans le calcul de l'utilité des travailleurs. En effet, moins d'heures de travail donne aussi plus de temps libre (cf. section 2.5.1).

Dans cette variante, nous faisons passer le nombre d'heures travaillées par semaine HpW_p de 39.6h à 32h pour un temps plein salarié du secteur privé, ce qui correspond à une réduction du temps de travail de 19.2%. Pour les emplois à temps partiel, nous appliquons le même pourcentage de réduction du temps de travail, ce qui fait passer le nombre d'heure de 23.2h à 18.7h. La production et le salaire hebdomadaire des emplois baissent mécaniquement car ces deux variables dépendent directement du nombre d'heures travaillées sur le poste (cf. section 2.3.3.1 sur les postes de l'entreprise). Nous avons cependant maintenu la barrière du SMIC pour les salaires.

Les résultats sont présentés sur le tableau 6.4.

Avec la réduction du temps de travail, nous observons une nette diminution du taux de chômage. qui passe de 9,78% à 6,64%. Il y a 877 000 chômeurs en moins. Il y a en revanche 1 228 000 emplois en plus. Cette différence entre le nombre d'emplois en plus et le nombre de chômeurs en moins s'explique par une augmentation du taux d'activité de 0.97 points. En effet, comme la situation de l'emploi s'améliore, il y a moins de découragement de chômeurs et plus d'entrées d'inactifs sur le marché du travail. Nous remarquons que la réduction du chômage avec cette variante profite à tous les âges et à toutes les catégories socio-professionnelles.

Toutefois, le salaire moyen en équivalent temps plein baisse en passant de 2036 à 1855 euros net par mois. Malgré la baisse du chômage et l'augmentation du temps libre, il apparaît que les individus sont en moyenne légèrement moins satisfaits avec une baisse légère de leur utilité (-2.7 %), car ils voient leur revenu moyen diminuer (-9%). En revanche le premier décile de la distribution de l'utilité des individus dans la simulation (qui correspond aux individus avec le moins d'utilité) passe de 108,8 à 114,1 (+4.9%). En terme de bien-être la mesure est donc plus "égalitaire". Les individus en emploi perdent du salaire, mais les individus sans emploi ont plus de chance d'en obtenir un.

Du côté des entreprises, on observe une baisse du revenu moyen, qui est due à une baisse de la production moyenne des travailleurs qui passe de 6793 à 5471 par mois dans la simulation

Indicateurs	Référence	Variante	Impact
Taux de chômage (%)	9.78	6.64	-3.14**
Taux de chômage 15-24 ans (%)	20.88	16.89	-3.99**
Taux de chômage 25-49 ans (%)	8.4	5.33	-3.07**
Taux de chômage 50-64 ans (%)	6.84	4.09	-2.75**
Taux de chômage Employés/Ouvriers (%)	10.84	6.47	-4.37**
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	6.71	4.26	-2.45**
Taux de chômage Cadres (%)	4.64	3.83	-0.81**
Taux d'activité (%)	66.93	67.9	+0.97**
Taux d'emploi (%)	60.38	63.39	+3.01**
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	24 629	25 857	+1 228**
Nombre de chômeurs (en milliers)	2 672	1 795	-877**
Salaire net mensuel moyen EQTP en euros	2036	1855	-184**
Revenu moyen par unité de consommation en euros	1392	1328	-64**
Utilité moyenne des individus	196.3	191.1	-5.2**
Revenu moyen des firmes sur l'année en milliers d'euros	394	371	-23**
Coût moyen des salaires en milliers d'euros	200	189	-11**
Bénéfice moyen des firmes sur l'année en milliers d'euros	189	178	-11**
Taux de chômage de long terme (%)	34.6	28.7	-5.9**
Part d'emploi à temps partiel (%)	21.04	19.92	-1.12**
Taux de rotation (%)	45.26	40.02	-5.24**
Nombre d'épisodes de CDD moyen	1.97	1.92	-0.05**

Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 6.4 – Réduction du temps de travail

(-19.5%). On observe que l'augmentation du nombre d'emplois ne compense pas cette perte de production moyenne des salariés, car le revenu global des entreprises baisse (-23 000 euros). Le coût moyen des salaires pour l'entreprise baisse aussi avec cette diminution du temps de travail (-11 000 euros), mais dans une moindre mesure que les revenus, ce qui se traduit au final par une diminution des bénéfices des entreprises de 11 000 euros (-5.8% en écart relatif).

Il est intéressant de constater qu'une mesure qui peut faire baisser le niveau de chômage, n'apporte pas forcément plus de satisfaction pour les acteurs économiques. En moyenne, les individus ont moins d'utilité (-2,0%) et les entreprises font moins de bénéfices (-5.8%). La mesure est cependant plus égalitaire, car les individus avec le moins d'utilité (1er décile), voient leur utilité augmenter (+4.9%).

6.2.3.1 Variantes avec maintien des salaires

Nous avons testé deux autres variantes de la réduction du temps de travail permettant d'éviter une baisse de l'utilité des individus :

- une variante 2 avec maintien de salaires qui implique un surcoût pour l'entreprise car la salarié produit moins pour le même salaire.
- une variante 3 avec maintien des salaires, mais subventionné par l'État. Pour l'entreprise, il y a une diminution des salaires versés, ce qui ne diminue pas le coût horaire du travail, mais l'État compense la perte de salaire avec une subvention, de façon à maintenir le salaire des employés constant.

Les résultats sont présentés sur le tableau 6.5.

Indicateurs	Référence	Variante 1 - Passage au 32h avec réduction des salaires	Variante 2 - Passage au 32h avec maintien des salaires	Variante 3 - Passage au 32h avec maintien des salaires subven- tionné
Taux de chômage (%)	9.78	6.64	8.95	8.03
Taux de chômage 15-24 ans (%)	20.88	16.89	18.68	17.11
Taux de chômage 25-49 ans (%)	8.4	5.33	7.57	6.69
Taux de chômage 50-64 ans (%)	6.84	4.09	7.03	6.38
Taux de chômage Employés/Ouvriers (%)	10.84	6.47	9.82	8.79
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	6.71	4.26	6.18	5.34
Taux de chômage Cadres (%)	4.64	3.83	4.54	3.91
Taux d'activité (%)	66.93	67.9	68.08	68.24
Taux d'emploi (%)	60.38	63.39	61.98	62.76
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	24 629	25 857	25 282	25 600
Nombre de chômeurs (en milliers)	2 672	1840	2 488	2 235
Part d'emploi à temps partiel (%)	21.04	19.92	19.32	18.48
Salaire net mensuel moyen EQTP en euros	2036	1855	2097	2097
Utilité moyenne des individus	196.3	191.1	203.5	205.5
Bénéfice moyen sur l'année en milliers d'euros	189	178	148	174
Coût de la mesure en milliards d'euros	-	0	0	102.7
Nombre d'emplois créés (en milliers)	-	+1244	+657	+987
Coût par emploi créé	-	0	0	104 040
Nombre de chômeurs évités (en milliers)		840	184	445
Coût par chômeur évité	-	0	0	230 988

TABLE 6.5 – Variante de réduction du temps de travail

Lorsque le salaire est maintenu constant (variante 2), nous observons une augmentation

du nombre d'emplois créés de +657 000 , mais l'impact sur le chômage est beaucoup plus faible, seulement 184 000 chômeurs en moins, car il y a une augmentation du taux d'activité de 1.15 points, ce qui représente 543 000 actifs en plus sur le marché du travail. Cette augmentation du taux d'activité s'explique par le fait que les offres d'emplois sont plus attractives pour les individus, car à salaire constant, il y a plus de temps libre. Ainsi l'utilité des emplois connus lors de la phase de prospection pour décider de commencer une recherche d'emploi augmente (cf. section 2.6.5.1). Nous observons que le salaire en équivalent temps plein ne baisse pas. De plus, l'utilité globale des individus augmente (+3.7%), car le taux d'emploi augmente (+1.6 points), le salaire est maintenu et le temps de travail diminue.

En revanche du côté des entreprises, cette mesure est bien sûr très pénalisante, car les salaires restent les mêmes, mais les travailleurs produisent moins. Il y a donc une perte de bénéfice importante de 41 000 euros par ans en moyenne (-21.7% en écart relatif).

Pour éviter cette perte de bénéfice, nous avons testé une 3ème variante avec un maintien des salaires mais subventionné par l'état afin que le coût du travail reste constant.

Dans ce cas, l'impact sur le chômage est bien sûr meilleur que dans la variante 2 sans subvention. Cependant, on s'attendrait à ce que le taux de chômage baisse autant que dans le cas avec réduction des salaires (variante 1) car dans les deux variantes le coût du travail est le même pour les entreprises. Mais ce n'est pas le cas. Cette différence s'explique pour deux raisons :

- d'une part le taux d'activité augmente plus dans la variante 3 que dans la variante 1, car, comme on l'a vu, les offres d'emplois sont plus attractives. Il y a 139 000 actifs en plus sur le marché du travail.
- d'autre part, dans la variante 3, la part d'emploi à temps partiel diminue par rapport à la variante 1 (-1.44 points). La part d'emploi à temps plein augmente donc. Ceci s'explique par le fait qu'une partie des individus qui souhaitaient travailler 23.2 heures par semaine avant la variante sont plus susceptibles d'accepter des emplois à temps plein qui sont maintenant caractérisés par un temps de travail de 32h plus proche des 23.2h (et qui offrent un bien meilleur salaire).

Le taux d'emploi est de 63.39 points dans la variante 1 et de 62.76 points dans la variante 3. L'écart relatif est de 1.0%. Cependant si on calcule le taux d'emploi en équivalent temps plein², on obtient 58.14 pour la variante 1 et 57.95 pour la variante 3, ce qui fait un écart relatif de 0.3%.

Concernant les avantages des agents, on observe que dans cette variante 3, l'utilité des individus augmente le plus (+9.2) et le bénéfice des entreprises est maintenu. Cependant cette mesure a un coût très élevé qui est 102.7 milliards d'euros par an, soit un coût brut par emploi créé de 104 040 euros et par an. Ce coût reste proche du coût des allègements de charges patronales. En revanche, le coût par chômeur évité est par contre beaucoup plus important, mais ceci est dû à l'augmentation du nombre d'actifs.

D'après un rapport de l'(Assemblée-Nationale, 2014), le passage de la durée légale de 39h à 35h à partir de l'année 2000 aurait coûté de l'ordre de 13 milliards d'euros pour 350

2. Le taux d'emploi en équivalent temps plein d'une classe d'individus est calculé en rapportant le nombre d'individus de la classe ayant un emploi converti en équivalent temps plein au nombre total d'individus dans la classe.

000 emplois créés. Il ne s'agissait pas d'une subvention complète comme ce que nous avons testé dans la variante 3, mais d'allègements de charges ou d'autres subventions ciblés pour compenser en partie le maintien des salaires. C'est ce qui explique que ce coût de 13 milliard soit beaucoup plus faible que les 102.7 milliards que nous calculons. De plus nous testons une réduction du temps de travail avec maintien des salaire de 39.6h à 32h, ce qui est plus important qu'un passage de 39h à 35h.

Il est nécessaire d'être prudent avec ces résultats chiffrés sur la réduction du temps de travail. En effet le modèle WorkSim ne prend pas en considération la consommation des ménages, et ne mesure pas l'effet potentiellement négatif d'une baisse de production des entreprises sur le long terme. De plus, il ne tient pas compte des problèmes de réorganisation des équipes dans les entreprises qui pourraient survenir. Dans la réalité, il n'est en effet pas toujours possible pour une entreprise de compenser la réduction du temps de travail par l'embauche de nouveaux salariés.

6.2.4 Étude de politiques des contrats

Les CDD ont pris une place importante sur le marché du travail d'un grand nombre de pays européens, et c'est particulièrement vrai pour la France et l'Espagne (cf. le papier de (Bentolila *et al.*, 2010) présenté dans la section 1.2.3). Bien qu'en 2011, en France, seulement 10.1% des employés du secteur privé soient en CDD, contre 84% d'employés en contrat à durée indéterminée (CDI), les CDD représentent 80% des nouvelles embauches. De plus, le nombre de très courts CDD a considérablement augmenté depuis 2003 (à titre d'exemple, le nombre de CDD d'une semaine ou moins a augmenté de 120% sur la période 2000-10 (Berche *et al.*, 2011)). Le plus haut taux de rotation de la main-d'oeuvre résultant de cet usage massif de contrats courts est susceptible d'avoir des effets importants sur le fonctionnement du marché du travail, et notamment sur les expériences de chômage des travailleurs qui passent par ces épisodes de CDD. Nous avons vu dans le chapitre 5 de caractérisation du marché du travail français, que ces faits stylisés sont bien reproduits dans notre simulation de référence.

Il y a dans la littérature de fortes controverses à propos des *effets des CDD sur le chômage*, certains de ces effets pouvant augmenter le chômage et d'autres le réduire :

L'effet tampon – Les employeurs considèrent que les CDD sont indispensables pour répondre aux fluctuations à court terme de la demande dans un contexte où les coûts de licenciements de CDI sont élevés (voir par exemple l'étude de (De Froment, 2012)). Ainsi une interdiction des CDD dans le cas où la demande est incertaine conduirait les employeurs à moins recruter qu'ils ne le feraient si les CDD étaient autorisés. Cependant, comme l'ont montré (Bentolila et Bertola, 1990), l'effet négatif des coûts de licenciement élevés sur l'emploi est en fait ambigu car ces coûts de licenciements diminuent aussi les sorties de l'emploi.

L'effet de sélection – D'autres économistes (Faccini, 2008; Bucher, 2010; Berson et Ferrari, 2013) ont montré que les CDD permettent de sélectionner les jeunes travailleurs (sans coût de licenciement), afin de leur donner éventuellement un CDI plus tard.

L'effet d'expérience – (Ballot, 1981; Ballot, 2002) montre que les CDD permettent à des travailleurs d'acquérir de l'expérience, ce qui augmente leur probabilité d'accéder à un CDI, que

ce soit dans la même entreprise ou dans une autre³.

L'effet tremplin – Les deux précédents effets peuvent être regroupés sous une étiquette commune d'*effet tremplin* : les CDD permettent aux entreprises de recruter en prenant moins de risques des travailleurs inexpérimentés pour lesquels elles n'ont pas assez d'informations sur leurs niveaux de productivité réels (par exemple, diplômés non reconnus). Ces emplois en CDD permettent ainsi aux nouveaux entrants et aux travailleurs inexpérimentés "de mettre un pied à l'étrier" et de s'insérer (ou de se réinsérer) sur le marché du travail.

L'effet de rotation – D'autres économistes comme Blanchard et Landier soulignent que les fins des CDD, compte tenu de leur interdiction de renouvellement à l'infini (en France, pas plus d'une fois pour un même contrat), envoient fréquemment les travailleurs au chômage (Blanchard et Landier, 2002b).

Une meilleure compréhension du choix entre CDD et CDI est nécessaire pour évaluer ces effets sur le chômage et comprendre les interactions de ces contrats avec les institutions du marché du travail, comme les coûts de licenciement. Il est primordial pour de nombreux pays de savoir si le droit du travail doit être réformé. Ces questions sont donc au cœur des études que nous pouvons mener avec WorkSim.

WorkSim est en fait le seul modèle actuel capable de tenir compte de l'ensemble des principaux effets de ces contrats sur le marché du travail, et ceci pour les raisons suivantes :

- nous modélisons le capital humain et les formations, donc nous pouvons rendre compte de l'effet tremplin des CDD. En effet, dans la simulation, 15% des employés en fin de CDD sont titularisés en CDI. Ces CDD donnent aussi une plus grandes chances aux individus d'obtenir aussi un CDI dans une autre entreprise grâce au gain de capital humain.
- dans WorkSim, le choix entre CDD et CDI est endogène avec la prise en compte de *l'effet tampon* des CDD en cas de baisse future de la demande (cf. section 2.5.2.4).
- enfin, nous modélisons aussi *l'effet de rotation*, car notre modèle est capable de rendre compte des importants taux d'entrée et de sortie de l'emploi en CDD (cf. section 5)

Nous avons mis en évidence dans le chapitre précédent, l'influence des facteurs comportementaux sur le choix CDD et CDI. Il apparaît que les employeurs sont très pessimistes. Lorsque les incertitudes sur leur niveau de demande future sont élevées, ils préfèrent embaucher en CDD pour ne pas prendre le risque de devoir licencier plus tard un salarié en CDI (cf section 5.4.2.2).

Nous avons vu que les employeurs préfèrent les CDD aux CDI notamment lorsque la volatilité de la demande des firmes augmente (cf. section 5.4.3.3) et lorsque les coûts de formations requis à l'embauche sont faibles (cf. section 5.4.2.3). A l'inverse, il préfèrent les CDI pour amortir les coûts de formation à l'embauche quand ceux ci deviennent élevés, et lorsque le risque sur la demande est faible. Dans ce cas, il est en effet plus profitable pour un employeur d'embaucher des individus avec un CDI pour profiter des gains d'expériences de l'individu sur le poste, ne pas payer de prime de précarité et amortir les coûts de formation à l'embauche.

3. Pour des preuves empiriques voir (Booth *et al.*, 2002)

Nous souhaitons maintenant dans cette partie étudier des variantes de politique de ces contrats de façon à mieux analyser l'effet global de ces contrats sur le marché du travail. Pour bien comprendre le rôle des CDD, nous testons tout d'abord une simulation de suppression de ces contrats.

6.2.4.1 La suppression des CDD

Actuellement, pour des raisons de complexité, aucun modèle analytique ne prend en compte tous les effets des CDD qui vont dans des directions opposées. C'est pourquoi les économistes n'ont actuellement pas les moyens de savoir si l'effet global des CDD sur le chômage est positif ou négatif. Par ailleurs, l'utilisation de données expérimentales pour mesurer cet effet n'est pas possible car aucun gouvernement n'a encore interdit les CDD. De même, il n'y a jamais eu non plus d'expérience inverse au cours de laquelle un gouvernement aurait soudainement autorisé les CDD⁴.

Le modèle WorkSim est capable de prendre en compte ces différents effets opposés des CDD sur le chômage comme nous l'avons vu ci-dessus. Nous testons donc une variante de Work-Sim dans laquelle les CDD sont supprimés. Il est interdit aux entreprises d'embaucher de nouveaux individus en CDD et de renouveler les CDD. Les individus qui sont en CDD au moment où nous supprimons ces contrats ne sont cependant pas automatiquement licenciés et terminent leur contrat à durée déterminée.

Une première étude de la suppression des CDD a été publiée dans (Goudet *et al.*, 2015) avec une version antérieure du modèle. Ce papier mettait en évidence principalement *l'effet de rotation* des CDD, mais ne rendait pas bien compte de *l'effet tampon* car le choix entre CDD et CDI n'était pas complètement endogène.

Avec le nouveau modèle, nous mesurons l'impact de la suppression des CDD deux ans après, puis quatre ans après à partir de la sauvegarde du modèle stabilisé. Il faut en effet plus de temps avant que les entreprises s'adaptent à cette suppression d'un contrat. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.6.

Deux ans après la suppression des CDD, nous observons que le taux de chômage augmente fortement et notamment celui des jeunes et des employés/ouvriers qui sont majoritairement concernés par ces emplois en CDD. Ceci est dû à un grand nombre de sorties de l'emploi car les individus qui étaient en CDD ne sont pas réembauchés rapidement en CDI.

Après 4 ans, l'impact sur les taux de chômage est plus faible car une partie des individus retrouvent un emploi en CDI, mais une autre partie de ces individus sont découragés car on observe que le taux d'activité baisse fortement de -1.03 points, ce qui correspond à 420 000 personnes en moins sur le marché du travail. Il devient difficile pour une partie des individus les moins employables qui étaient en CDD de retrouver un emploi en CDI. On observe que la part des chômeurs de long terme (de plus d'un an) augmente fortement (+11.1 points). La disparition de *l'effet tremplin* et de *l'effet tampon* des CDD explique ces découragements. Alors même que le taux de chômage diminue peu, on observe en fait une diminution nette de l'emploi global avec 489 000 postes en moins. La part d'emploi à temps partiel dans l'emploi

4. Boeri dans son étude de la littérature sur la protection de l'emploi ne mentionne aucune de ces expériences (Tito, 2011).

Indicateurs	Impact après 2 ans	Impact après 4 ans
Taux de chômage (%)	+2.61**	+0.42**
Taux de chômage 15-24 ans (%)	+6.98**	+2.29**
Taux de chômage 25-49 ans (%)	+2.11**	+0.04
Taux de chômage 50-64 ans (%)	+1.22**	+0.1
Taux de chômage Employés/Ouvrier (%)	+2.95**	-0.69**
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	+1.6**	-0.61**
Taux de chômage Cadres (%)	-0.25**	-0.36**
Taux d'emploi (%)	-2.37**	-1.20**
Taux d'activité (%)	-0.72**	-1.03**
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	-967**	-489**
Salaires net mensuel moyen EQTP en euros	+19**	-9.7**
Revenu moyen par unité de consommation en euros	-31**	-36**
Utilité moyenne des individus	-5.3**	-5.6**
Revenu moyen sur l'année en milliers d'euros	-17**	-12**
Coût moyen des salaires en milliers d'euros	-9**	-9**
Bénéfice moyen sur l'année en milliers d'euros	-7**	-3**
Taux de chômage de long terme (%)	+20.4**	+11.1**
Part d'emploi à temps partiel (%)	+2.61**	+3.8**
Taux de rotation (%)	-25.1**	-19.1**

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 6.6 – Effet de la suppression des CDD après 2 et 4 ans

total augmente aussi de +3.8 points. Certains individus qui étaient en CDD à temps plein retrouvent un emploi en CDI mais seulement à temps partiel.

On observe aussi que le taux de rotation diminue fortement, de -19.1 points alors que le nombre d'entrée en CDI sur l'année augmente (de 42% en écart relatif). Il y a donc moins d'*effet de rotation* négatif sur le marché du travail. Pour une partie des individus cette suppression des CDD est profitable car elle leur permet d'accéder à des CDI. Après 4 ans, les taux de chômage des professions intermédiaires et des cadres diminuent même alors qu'il est plus élevé pour les employés/ouvriers.

D'un point de vue global, nous constatons que la diminution de *l'effet de rotation* ne compense pas la perte de *l'effet tremplin* et de *l'effet tampon* des CDD. L'effet global de la suppression des CDD est négatif. On montre aussi que la suppression des CDD est plus inégalitaire, car elle pénalise fortement les jeunes et les employés/ouvriers. *Au lieu de la diminuer, la suppression des CDD renforce en fait la segmentation sur le marché du travail.* Une partie des individus qui étaient en CDD retrouve un emploi en CDI tandis que d'autres s'éloignent encore plus de l'emploi. Ces analyses rejoignent celles de (Bunel, 2007) qui montre que les CDD et CDI sont davantage complémentaires que substituables.

6.2.4.2 CDD renouvelables 2 fois

Dans cette section, nous proposons d'examiner une mesure d'actualité sur les contrats. Il s'agit de la proposition du gouvernement formulée en juin 2015 d'accorder la possibilité de renouveler deux fois, au lieu d'une, les contrats CDD dans la limite des 18 mois. Au contraire de la suppression des CDD évaluée dans la section précédente, cette politique favorise plutôt le CDD.

Nous avons donc testé une variante en ajoutant cette option supplémentaire de renouvellement. Nous gardons l'hypothèse faite dans le modèle que le renouvellement est de la même durée que la durée initiale du contrat. Au niveau de l'évaluation d'un contrat, ceci ajoute une option de fin de CDD. Par exemple, au moment de l'évaluation de la création d'un nouveau contrat CDD, il y a trois fins possibles : durée initiale du CDD, d_{CDD} , puis deux fois cette durée et enfin trois fois cette durée, toujours dans la limite de 18 mois. Dans le cas d'un CDD, l'ensemble des options de durée possible et qui intervient dans l'équation 22 de l'annexe C est maintenant :

$$D_c^{option} = \{d_{CDD}, \text{Min}(2 \times d_{CDD}, 18\text{mois}), \text{Min}(3 \times d_{CDD}, 18\text{mois})\} \quad (6.1)$$

Les résultats de cette variante sont présentés dans le tableau 6.7. Il apparaît que cette mesure augmente légèrement le chômage de 0.25 points, à cause d'un plus fort effet de rotation de la main d'oeuvre (+6.67 points). Il y a moins d'entrées en CDI (-0.66 points) et plus d'entrées en CDD (+7.08 points). Ceci s'explique par le fait que l'option supplémentaire de renouvellement rend plus attractif le CDD par rapport au CDI pour les employeurs, ce qui encourage la précarité. Dans la simulation, il y a aussi un peu moins de chance pour les individus d'être titularisés en CDI à la fin du contrat. Cette chance passe de 15% à 14% car il est plus intéressant pour les employeurs de renouveler le contrat, sachant qu'il reste encore une option de renouvellement par la suite.

On observe cependant que cette mesure diminue la part de chômeurs de long terme (-1.4 points) en favorisant plus de rotation sur le marché du travail. En terme d'utilité pour les individus et de bénéfices pour les entreprises, nous n'observons pas de changements significatifs.

6.2.4.3 Variantes sur les coûts des licenciements

Plutôt que de supprimer ou de faciliter la création de CDD, nous souhaitons étudier s'il ne serait pas souhaitable de favoriser la création d'emplois en CDI. Nous avons montré que les employeurs hésitent à recruter en CDI en raison du risque que représente un licenciement en cas de baisse de la demande. Dans cette expérience, nous faisons varier les coûts de licenciement totaux du CDI $EndC_c(d_{CDI})$ (cf. Annexe D) en les multipliant par un facteur compris en 0 et 50. Nous mesurons l'impact de ces changements de coût de licenciement après deux ans dans la réalité.

Nous observons une faible sensibilité du chômage au taux de licenciement économique. Le taux de chômage n'augmente que d'un point lorsque nous multiplions les coûts de licenciement par 50 (cf. figure 6.2). Ceci peut s'expliquer par le fait que les employeurs substituent les recrutements en CDI par des recrutements en CDD comme nous pouvons le voir sur la

Indicateurs	Référence	Variante	Impact
Taux de chômage (%)	9.78	10.03	+0.25**
Taux de chômage 15-24 ans (%)	20.88	21.01	+0.13**
Taux de chômage 25-49 ans (%)	8.4	8.72	+0.32**
Taux de chômage 50-64 ans (%)	6.84	6.92	+0.08
Taux de chômage Employés/Ouvriers (%)	10.84	11.36	+0.52**
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	6.71	6.93	+0.22**
Taux de chômage Cadres (%)	4.64	4.81	+0.17**
Taux d'activité (%)	66.93	66.82	-0.11**
Taux d'emploi (%)	60.36	60.11	-0.25**
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	24 629	24 519	-110**
Nombre de chômeurs (en milliers)	2 672	2 737	+65**
Salaire net mensuel moyen EQTP en euros	2036	2041	+5**
Revenu moyen par unité de consommation en euros	1392	1391	-1
Utilité moyenne des individus	196.3	196.3	0
Revenu moyen sur l'année en milliers d'euros	394	392	2
Coût moyen des salaires (sans les coûts annexes) en milliers d'euros	200	200	0
Bénéfice moyen sur l'année en milliers d'euros	189	187	0
Taux de chômage de long terme (%)	34.6	33.2	-1.4**
Part d'emploi à temps partiel (%)	21.04	20.82	-0.12**
Taux de rotation (%)	45.26	51.93	+6.67**
Nombre d'épisodes de CDD moyen	1.97	2.2	+0.23

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 6.7 – Variante avec CDD renouvelable deux fois

figure 6.2.

Un autre résultat important que nous observons sur cette figure 6.2 est que même quand les coûts de licenciement sont à 0, les recrutements en CDI restent faibles. En effet, quand les employeurs évaluent la création d'un CDI, ils intègrent l'idée qu'ils n'auront pas la possibilité de licencier si la demande baisse et/ou que le salarié n'est plus rentable. Il faut en effet que leur profit annuel global soit en dessous d'un seuil de rentabilité pour pouvoir mettre en place un plan de licenciement économique (cf. section 2.6.4). Comme ils ne peuvent pas anticiper ce profit global, ils anticipent qu'ils devront garder le travailleur jusqu'à la fin de la durée moyenne attendue du CDI (cf. section 7.4). Un résultat important de notre étude est donc que la difficulté de licencier peut avoir un impact plus important que les coûts de licenciement en eux-même sur les faibles taux d'entrée en CDI que nous observons en France en 2011.

Nous testerons donc dans la section suivante une variante dans laquelle les entreprises n'ont pas besoin de justifier légalement le licenciement d'un salarié en CDI.

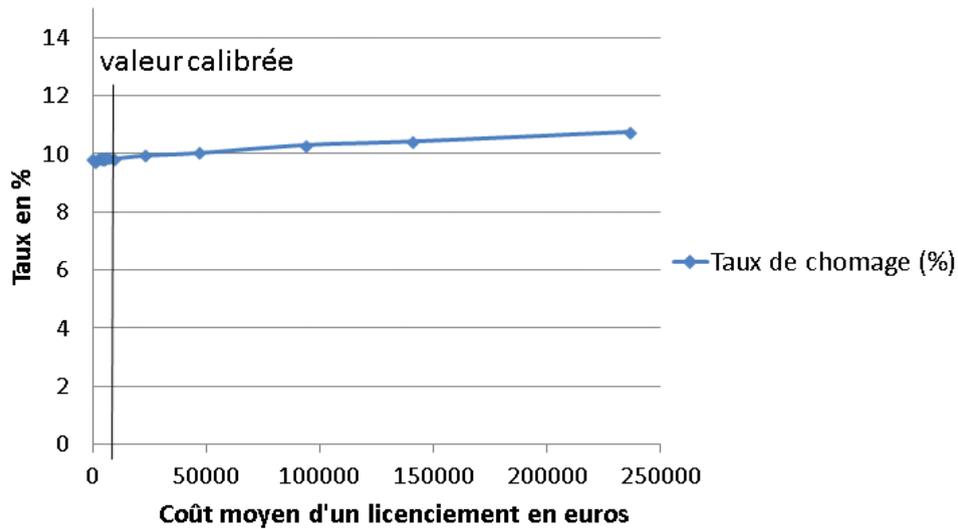


FIGURE 6.1 – Sensibilité aux coûts de licenciement moyen en euros

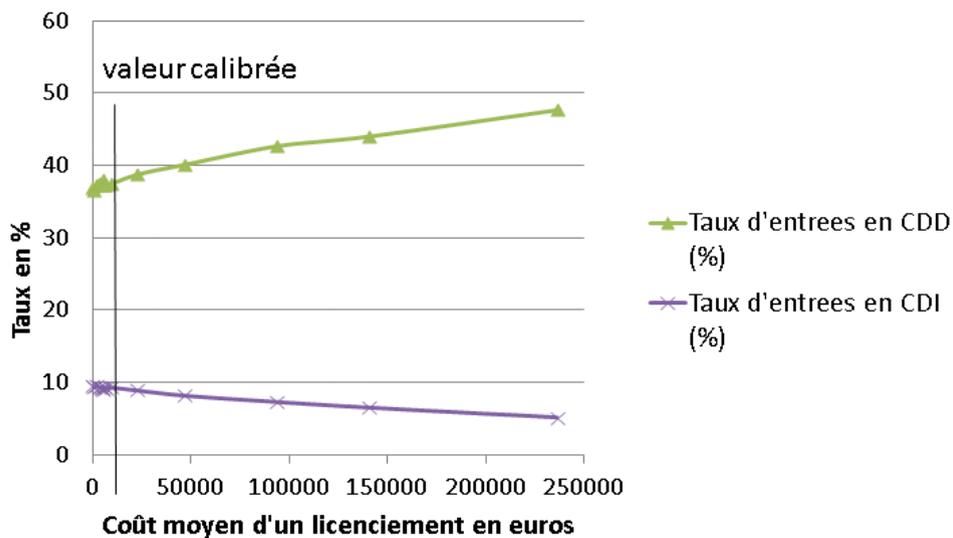


FIGURE 6.2 – Sensibilité aux coûts de licenciement moyen en euros

6.2.4.4 Suppression du besoin de justifier légalement un licenciement

Dans la simulation de référence, l'entreprise doit être dans l'état *perte* pour pouvoir justifier la mise en place d'un plan de licenciement économique (cf. section 2.6.4), comme c'est le cas en 2011 en France. Nous effectuons une variante qui consiste à supprimer cette condition légale. Avec cette variante, d'une part, l'entreprise évalue à chaque période l'intérêt de licencier des individus pour chaque niveau de qualification si son niveau de demande tombe en dessous d'un certain seuil (cf. section 2.6.4) sans devoir justifier ces licenciements. D'autre part, au moment de l'évaluation d'un contrat CDI, l'employeur anticipe qu'il dispose de cette

possibilité de licenciement chaque période future. Par conséquent, le contrat est toujours évalué jusqu'à la fin de la durée moyenne attendue du CDI, d_{CDI} , (cf. section 7.4), et l'employeur dispose d'une option de fin de contrat chaque période future donc $D_c^{option} = \{1, 2, \dots, d_{CDI}\}$. Ainsi, l'employeur choisit la durée de fin du contrat dans l'ensemble $\{1, 2, \dots, d_{CDI}\}$ qui donne le meilleur profit pour chaque scénario θ d'évolution de sa demande (cf. équation 22 de l'annexe C).

Les résultats de cette variante sont présentés dans le tableau 6.8.

Indicateurs	Reference	Variante	Impact
Taux de chômage (%)	9.78	7.89	-1.89**
Taux de chômage 15-24 ans (%)	20.88	11.17	-9.71**
Taux de chômage 25-49 ans (%)	8.4	7.03	-1.37**
Taux de chômage 50-64 ans (%)	6.84	8.32	+1.48**
Taux de chômage Employés/Ouvriers (%)	10.84	7.74	-3.1**
Taux de chômage Professions Intermédiaires (%)	6.71	7.49	+0.78**
Taux de chômage Cadres (%)	4.64	5.51	+0.87**
Taux d'activité (%)	66.93	67.48	+0.55**
Nombre d'individus en emploi total (en milliers)	24 629	25 355	+726**
Salaires net mensuel moyen EQTP en euros	2036	1996	-40**
Revenu moyen par unité de consommation en euros	1392	1410	+18**
Utilité moyenne des individus	196.3	202	+5.7**
Revenu moyen des firmes sur l'année en milliers d'euros	394	411	+17**
Coût moyen des salaires (sans les coûts annexes) en milliers d'euros	200	205	+5**
Bénéfice moyen sur l'année en milliers d'euros	189	197	+8**
Taux de chômage de long terme (%)	34.6	31.9	-2.7**
Part d'emploi à temps partiel (%)	21.04	19.03	-2.01**
Taux de rotation (%)	45.3	37.8	-7.5**
Nombre d'épisodes de CDD moyen	1.97	1.15	-0.82**
Probabilité de perdre son emploi dans l'année	0.087	0.144	+0.057**

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 6.8 – Suppression du besoin de justifier un licenciement pour un employeur

Lorsque nous supprimons la condition légale d'être dans l'état *perte* pour licencier un salarié en CDI, nous observons que les entreprises embauchent beaucoup plus en CDI, car les CDI deviennent moins risqués en cas de baisse de la demande future. Le taux d'entrée en CDI passe de 9.16% à 30.78% et parallèlement le taux d'entrée en CDD diminue fortement de 38.3% à 6.26%. La part des CDD en stock dans l'emploi total passe de 10.33% à 1.74%. La quasi-totalité des individus obtiennent donc un CDI. En revanche, nous observons une augmentation très nette du taux de licenciement économique qui passe de 0.44% à 26.13%. Les entreprises recrutent beaucoup plus en CDI mais licencient aussi plus pour s'ajuster à la variation de leur demande.

Les ajustements de main-d'œuvre qui se faisaient avec des CDD sont remplacés en partie

par de très fort taux d'entrée et de sortie de l'emploi en CDI. Cependant, le taux de rotation global sur le marché du travail diminue de 46.23% à 37.76%. On observe en parallèle que l'ancienneté moyenne des contrats CDI passe de 4.76 années à 2.23 années. Les contrats en CDI sont donc plus précaires.

De plus, il apparaît que cette variante réduit le taux de chômage global de 1.89 points et que la réduction est particulièrement importante pour les jeunes pour lesquels le taux de chômage passe de 20.88% à 11.17%. En revanche cette mesure pénalise les seniors pour lesquels le taux de chômage passe de 6.84% à 8.32% à cause du plus grand nombre de licenciements économiques. De même, on observe une diminution du taux de chômage des Employés/Ouvriers alors que ce taux augmente pour les autres catégories socioprofessionnelles.

Les catégories les plus précaires des jeunes et des Employés/Ouvriers qui étaient majoritairement employés en CDD obtiennent désormais des CDI, ce qui diminue leur taux de chômage. En revanche, les plus âgés et les catégories socioprofessionnelles qui étaient majoritairement employés en CDI sont pénalisés par la possibilité donnée aux employeurs de licencier sans condition légale. Leur taux de chômage augmente car les individus sont moins protégés. Nous voyons en effet sur le tableau 6.8 que pour un individu en emploi, la probabilité de le perdre dans l'année augmente fortement 0.087 à 0.144.

On observe avec cette mesure que les salaires des individus en emploi baissent légèrement (-2.0%) pour deux raisons. D'une part, les durées des CDI étant plus courtes, les individus cumulent moins de capital humain spécifique sur leur poste. D'autre part, les individus les plus âgés, et dont les salaires sont plus élevés, sont licenciés au profit des plus jeunes. Le revenu moyen par unité de consommation augmente cependant légèrement car il y a plus d'individus en emploi.

Les effets de cette variante sont bénéfiques pour les individus qui voient leur niveau d'utilité augmenter (+2.9% en écart relatif). Du point de vue des employeurs, les revenus et les bénéfices des entreprises augmentent aussi (+4.2% en écart relatif).

Avec cette mesure, on tend à se rapprocher d'un *contrat unique*, car les employeurs n'ont plus besoin réellement des CDD grâce à une grande flexibilité des CDI. Nous avons vu précédemment que la suppression des CDD sans assouplir les CDI conduit à encore plus de segmentation sur le marché du travail, car les individus qui étaient en CDD ne retrouvent pas tous un CDI (cf. section 6.2.4.1). Tandis qu'avec cette variante de suppression de la contrainte légale des licenciements, les CDD disparaissent, non pas qu'il soient interdits, mais parce qu'ils perdent toute utilité pour les employeurs.

Dans la simulation de référence, une partie des individus était très protégée avec des CDI alors que l'autre alternait des épisodes de chômage et des épisodes de CDD. Avec cette variante, on observe qu'il y a moins de segmentation sur le marché du travail, puisque la quasi-totalité des individus obtiennent des CDI. En contrepartie, on observe que ces CDI deviennent plus précaires car le taux de licenciement augmente fortement. Pour les individus qui sont en emploi avant cette mesure, c'est-à-dire pour les "insider", cette politique a des conséquences négatives.

La suppression de la contrainte légale pour licencier a des effets positifs sur l'emploi, mais protège moins les individus en CDI. On peut se demander alors comment réagit le marché du travail avec cette variante, en cas de crise .

Réponse à des chocs macroéconomiques avec cette variante Nous avons évalué la réponse du marché du travail à des chocs macroéconomiques sur notre économie avec ou non cette condition légale de licenciement d'un CDI. Pour cela nous avons relancé le même type de simulation que dans la section 5.4.3.2. Nous faisons varier la demande globale D_{tot} qui est répartie entre les firmes (cf. section 2.3.2.2). Pour cela, nous multiplions D_{tot} par un facteur entre 0.5 et 2 et nous observons la réponse du modèle après 104 périodes (2 ans) à partir de la sauvegarde du modèle.

Nous observons sur la figure 6.3, que l'économie réagit beaucoup plus mal à un choc de demande négatif, quand la condition légale de licenciement est supprimée. En dessous du facteur 0.8 de demande, la courbe du taux de chômage en rouge passe au dessus de la courbe bleue. De la même façon sur la figure 6.3, la courbe du taux d'emploi en rouge passe en dessous de la courbe du taux d'emploi en bleu.

On met en évidence ici le rôle protecteur des CDI et de la condition légale de licenciement en cas de baisse de la demande. Par conséquent, dans une situation de crise, les employeurs ne peuvent pas licencier facilement, ce qui limite la baisse du chômage. C'est ce qui s'est passé pendant la crise financière de 2007-2010, l'économie française a été moins touchée par le chômage que d'autres pays, comme les États-Unis, qui ont une politique de l'emploi moins protectrice. On remarque cependant qu'avec un plus haut niveau de protection de l'emploi, le chômage structurel est plus important. Lorsque nous augmentons la demande, le taux de chômage est de 6.5% alors qu'il n'est que de 5% si on supprime les conditions légales de licenciement.

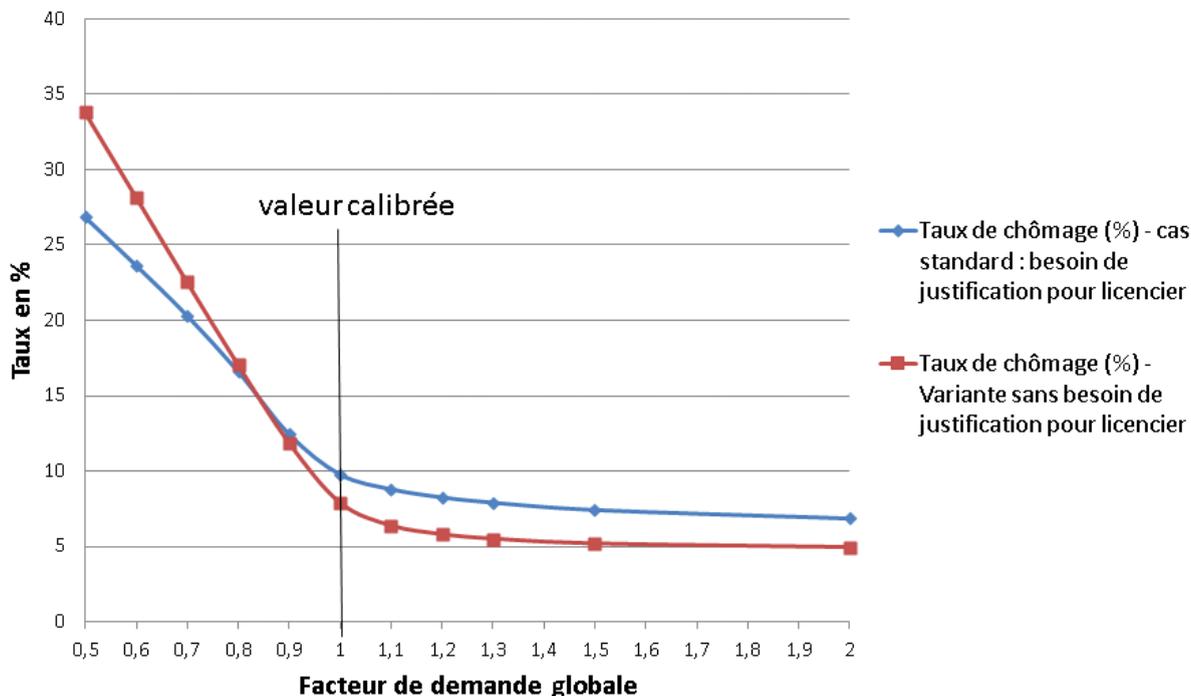


FIGURE 6.3 – Réponse du modèle à un choc de demande avec ou sans la variante de la contrainte légale de licenciement

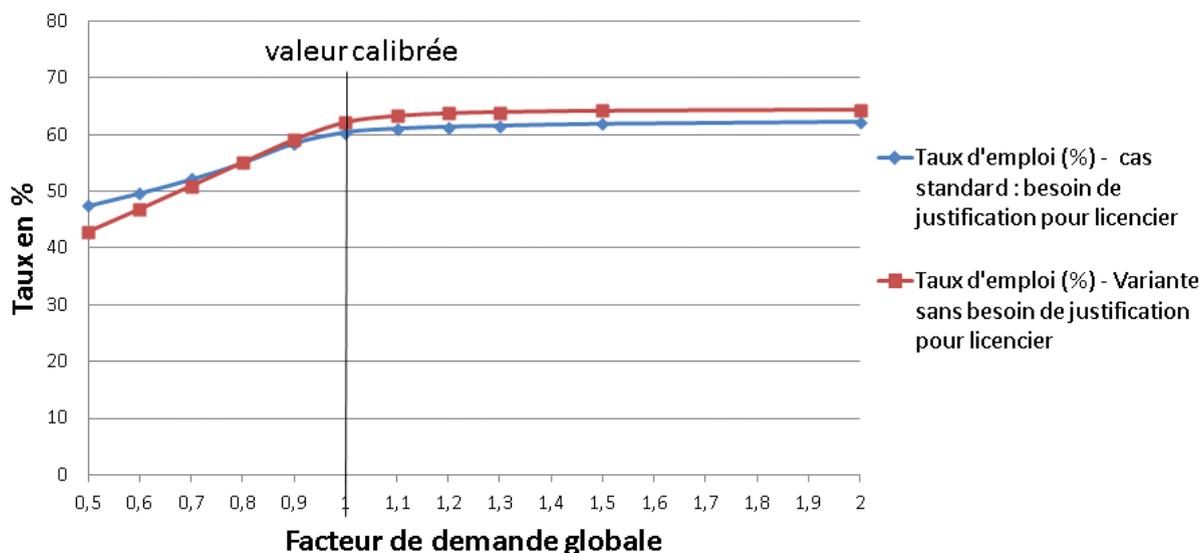


FIGURE 6.4 – Réponse du modèle à un choc de demande avec ou sans la variante de la contrainte légale de licenciement

6.3 Bilan du chapitre

Nous avons étudié une série de politiques économiques suivant différents indicateurs. Nous montrons qu’il est difficile de trouver une politique publique qui donne de bons résultats pour tous les indicateurs et qui satisfait à la fois les entreprises et les individus.

Le contrat de génération

La méthode de modélisation multi-agent nous a permis dans le cas spécifique du CG de prendre en compte (et conjointement dans un cadre comptable cohérent en termes de flux) des effets essentiels mais difficiles à notre connaissance à modéliser par d’autres méthodes, à savoir la transmission d’expérience du senior au junior, et les effets d’éviction, tant au niveau des effets agrégés qu’au niveau des trajectoires individuelles. Nous montrons que le contrat de génération a des effets faibles sur le taux de chômage à cause notamment de nombreux effets d’aubaine.

Les allègements de charge

Nous montrons que le dispositif des allègements de charge permet de réduire substantiellement le chômage et notamment des plus précaires, c’est-à-dire des jeunes et des employés/ouvriers. Cependant nous montrons que son coût est élevé à cause notamment d’effets d’aubaine pour les entreprises. Il apparaît toutefois qu’un meilleur ciblage du dispositif autour du SMIC permettrait d’augmenter son efficacité.

La réduction du temps de travail

Nous avons mis en évidence que la réduction du temps de travail peut permettre d'améliorer la situation de l'emploi de façon très significative. Cependant dans la variante avec réduction des salaires en parallèle, nous montrons que cette politique diminue l'utilité moyenne des individus à cause de la baisse de salaire. Toutefois, l'utilité des individus qui en ont le moins (1er décile de la distribution) augmente et la mesure est donc plus "égalitaire".

Dans la cas où le salaire est maintenu, le taux d'emploi augmente beaucoup mais le taux de chômage diminue peu. Ceci est dû à une augmentation du taux d'activité. On voit à ce propos que la notion de taux du chômage n'est pas la plus pertinente pour mesurer l'efficacité d'une politique de l'emploi. Il faut mieux toujours raisonner en terme de taux d'emploi et si possible avec un taux d'emploi en équivalent temps plein. Il peut en effet y avoir plus d'emplois au niveau global, mais plus d'emplois à temps partiel et moins d'emplois à temps plein (cf. section 6.2.3.1). Dans cette variante avec maintien des salaires, la mesure est meilleure pour les individus, mais le profit des firmes chute substantiellement, ce qui peut avoir des conséquences à long terme sur la compétitivité des entreprises et avoir en retour des effets néfastes sur le chômage. Dans la variante avec maintien des salaires mais subventionné par l'état, la mesure de réduction du temps de travail est positive pour tous les agents mais coûte cher par emploi créé, soit à peu près autant que le dispositif des allègements de charges.

Les politiques des contrats

Les changements de politiques publiques concernant les contrats montrent des effets inattendus sur le chômage. Par exemple, les coûts de licenciement semblent avoir un impact faible sur le chômage, car nous montrons que c'est plutôt la difficulté de licencier qui reste un obstacle important aux recrutements en CDI.

Il apparaît que la suppression des CDD a des effets négatifs sur le chômage. Elle ne réduit pas les inégalités sur le marché du travail, mais les renforcent plutôt car une partie seulement des individus qui étaient en CDD retrouve un emploi en CDI, les autres s'éloignent plus durablement de l'emploi. Pour les jeunes la mesure est particulièrement pénalisante à cause de la suppression de l'effet tremplin des CDD.

Nous montrons par ailleurs qu'une mesure, comme la possibilité de renouveler deux fois les CDD, qui encourage la création de CDD a aussi des effets négatifs sur le chômage, car elle augmente la précarité. Il semble que la solution soit plutôt de faciliter l'embauche en CDI, en allégeant les contraintes légales pour licencier.

La mesure que nous avons testée, qui consiste à supprimer complètement les contraintes légales pour licencier, a des impacts très importants sur le fonctionnement du marché du travail. On observe en effet une réduction très forte du dualisme et une diminution massive du chômage des jeunes. Par contre cette mesure a des impacts négatifs sur la situation des individus qui sont majoritairement en CDI avant l'application de cette mesure, car la probabilité de perdre son emploi augmente et le chômage des plus âgés s'accroît. Nous montrons que cette variante peut avoir des conséquences néfastes en cas de crise. Le marché du travail répond en effet beaucoup plus négativement en cas de baisse brutale de la demande, car un plus grand nombre d'individus sont licenciés.

Le modèle va plus loin que des modèles partiels construits pour modéliser le choix entre CDD et CDI (cf. section 1.2.3), car il intègre un grand nombre de déterminants du choix entre CDD et CDI. Le modèle est générique car les contrats temporaires et permanents existent dans de nombreux pays, avec des coûts différents. Nous montrons que le modèle a donc un fort potentiel pour étudier des politiques de l'emploi, et plus généralement des politiques économiques et sociales, ainsi que des modifications dans les comportements.

Chapitre 7

Conclusion et perspectives

Ce chapitre présente la conclusion des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse. Nous présenterons tout d'abord un bilan général du modèle et des résultats que nous avons obtenus. Nous exposerons ensuite les apports principaux de notre étude pour la modélisation du marché du travail et pour la modélisation à base d'agents en sciences humaines et sociales. Nous terminerons par un exposé des perspectives ouvertes par ces travaux.

7.1 Bilan général

7.1.1 Le modèle multi-agent WorkSim

Dans ce modèle, deux catégories d'agents hétérogènes et autonomes sont en interaction, des agents "individu" et des agents "entreprise privée". Ces agents évoluent dans un environnement composé d'un module institutionnel qui comprend les principaux éléments du droit du travail. Nous nous appuyons sur le concept de rationalité limitée pour modéliser les comportements. Les agents, individus comme entreprises, révisent leurs décisions à la lumière de leur expérience et par collecte d'informations. Les règles de décision dans WorkSim utilisent des seuils (ou règles dites de *satisficing*) dont les déterminants sont justifiés par la théorie de la recherche. Du côté des entreprises, nous avons mis l'accent sur la modélisation endogène des choix de contrat, de façon à pouvoir étudier l'émergence de la segmentation sur le marché du travail en lien avec le droit du travail.

Notre modèle s'inscrit aussi dans la démarche de la microsimulation. Il rend compte des principales caractéristiques de la démographie française. Nous avons construit une maquette de la France à échelle réduite (1/4700), avec environ 10000 agents. Une particularité du modèle est de prendre en compte l'intégralité de la population en âge de travailler du pays avec les étudiants, les retraités, les inactifs, les chômeurs et les employés. Les individus sont regroupés dans des ménages. Les entreprises sont représentées selon une répartition par taille. Nous distinguons les postes, des contrats et des salariés.

A notre connaissance, WorkSim est actuellement le modèle multi-agent *le plus complet* d'un marché du travail.

7.1.2 Résultats du modèle

WorkSim permet de reproduire conjointement un grand nombre de caractéristiques précises du marché du travail français. Nos analyses confirment une segmentation forte entre les travailleurs sur le marché du travail français. Une partie des travailleurs ont des situations stables en CDI car les taux de licenciement sont faibles, tandis que d'autres alternent entre des épisodes de chômage et de CDD. Ceci est un fait stylisé important du marché du travail français.

Nous montrons l'importance de prendre en compte les choix rationnels des agents hétérogènes, individus et entreprises, pour comprendre le fonctionnement du marché du travail. Par exemple, lors de l'étude de la sensibilité au paramètre ζ , la part de la production de base en valeur retenue par la firme (cf. section 5.4.3.1), nous mesurons des effets non monotones sur le taux d'emploi. Ceci résulte des décisions des deux catégories d'agents. Lorsque les salaires sont trop hauts, les firmes créent moins d'emplois car ceux-ci sont moins rentables ; lorsque les salaires sont trop bas, le taux d'emploi baisse aussi car les individus ont moins d'intérêt à accepter un emploi.

Nous montrons aussi l'impact des anticipations dans les choix de créations de postes et de contrats de la part des employeurs. Le poids du scénario pessimiste dans l'évaluation de la demande a un impact fort sur le chômage. Ceci souligne l'importance de prendre en compte des facteurs psychologiques qui influencent les comportements des agents dans un modèle économique, comme l'a souligné le prix Nobel (Akerlof *et al.*, 2009).

Nous avons étudié une série de politiques économiques suivant différents indicateurs. Nous montrons qu'il est difficile de trouver une politique publique qui donne de bons résultats pour tous les critères et qui est bénéfique à la fois pour toutes les entreprises et tous les individus. Tout est affaire de compromis et de choix politique.

Nous montrons que le dispositif des allègements de charge permet de réduire substantiellement le chômage et notamment des plus précaires, les jeunes et des employés/ouvriers. Cependant nous évaluons que son coût est élevé à cause notamment d'effets d'aubaines pour les entreprises. Il apparaît toutefois qu'un meilleur ciblage du dispositif autour du SMIC permettrait d'augmenter son efficacité.

Parmi les variantes de réduction du temps de travail que nous avons testées, il semble qu'une politique de réduction du temps de travail avec une réduction en parallèle des salaires soit pertinente, car elle ne dégrade pas la compétitivité économique des entreprises et a un impact très important sur l'emploi. Elle est cependant légèrement pénalisante bien sûr pour les individus déjà en poste à cause d'une baisse de salaire, mais l'augmentation du temps libre compense en partie cette baisse, ce qui fait que la perte d'utilité n'est globalement pas très importante. Cette mesure est solidaire car elle permet à un plus grand nombre d'individus d'obtenir un emploi et réduit donc indirectement aussi les coûts du chômage.

Enfin, nous avons évalué des politiques des contrats. Il apparaît que la suppression des CDD a des effets négatifs sur le chômage. Elle ne réduit pas les inégalités sur le marché du travail, mais les renforce plutôt, car une partie seulement des individus qui étaient en CDD retrouve un emploi en CDI, les autres s'éloignent plus durablement de l'emploi. Pour les jeunes la mesure est particulièrement pénalisante à cause de la suppression de l'effet tremplin des CDD. Nous montrons par ailleurs qu'une mesure, comme la possibilité

de renouveler deux fois les CDD, qui au contraire encourage la création de CDD, a aussi des effets négatifs sur le chômage, car elle augmente la précarité. Il semble que la solution pour réduire le dualisme soit plutôt de faciliter l'embauche en CDI, en allégeant les contraintes légales pour licencier. Cette mesure réduit massivement le chômage des jeunes. Par contre cette politique détériore les conditions des *insiders*, car la probabilité de perdre son emploi augmente pour ceux qui sont en CDI. Il est difficile de trouver une mesure qui favorise les *outsiders* sans pénaliser les *insiders*. Il faudrait accompagner cette mesure d'un dispositif de suivi des chômeurs et de formation pour que les seniors notamment retrouvent un emploi facilement. On se rapprocherait alors de la proposition d'un contrat unique ou d'un système dit de "flexi-sécurité" (Boyer, 2006).

7.2 Apports de notre travail

7.2.1 Apports de l'approche multi-agent pour la modélisation du marché du travail

Le modèle WorkSim apporte des éléments nouveaux pour la modélisation du marché du travail par rapport aux modèles de recherche existants.

7.2.1.1 Modélisation explicite du processus de recrutement

La plupart des modèle économique du marché du travail utilise une unique fonction d'appariement pour modéliser les recrutements (par exemple le modèle de (Mortensen et Pissarides, 1994) présenté dans la section 1.2.2). Nous avons proposé une modélisation explicite du processus de recrutement qui repose sur des décisions plausibles des agents hétérogènes des deux types. Avec cette modélisation, les agents sont en concurrence sur le marché du travail, ce qui permet de rendre compte notamment des effets d'éviction qui sont souvent très importants en matière de politique de l'emploi.

7.2.1.2 Apport de l'approche multi-agent pour modéliser les trajectoires des individus

L'introduction de la théorie du capital humain permet de modéliser les trajectoires de carrière des individus sur le marché du travail. Les individus sont fortement hétérogènes, de part leurs attributs spécifiques, leur genre, leur âge, mais aussi par leur histoire (CV). Les individus gagnent de l'expérience en travaillant ou bien par la formation, ce qui leur permet d'avoir plus de chance de trouver un meilleur emploi plus tard. C'est un apport essentiel des modèles multi-agents pour la modélisation du marché du travail de pouvoir générer les trajectoires de carrières des agents. Cela permet en effet de saisir des éléments fondamentaux du marché du travail, comme des phénomènes de trappe à précarité, d'effets tremplin des contrats temporaires, d'effets sur le long terme d'une politique de l'emploi ciblée sur une catégorie d'agent, etc...

7.2.1.3 Modélisation endogène de la distribution des salaires

Dans WorkSim, les entreprises diffusent des offres d'emploi avec des propositions de salaires affichés différents. Les salaires à l'embauche sont ensuite modulés par les niveaux

d'expérience des candidats (grille de salaire). Ces salaires des nouveaux entrants sont aussi influencés par la tension sur le marché du travail et nous prenons en compte des facteurs de rigidité, comme le niveau du salaire minimum. La distribution des salaires émerge dans le modèle de façon endogène. Elle résulte des interactions entre les agents hétérogènes des deux côtés du marché du travail, individus comme entreprises. C'est un apport de la modélisation multi-agent, car les modèles avec un agent représentatif ne tiennent pas compte de la diversité des profils des individus et échouent donc à expliquer de façon convaincante la distribution des salaires dans l'économie.

7.2.1.4 Distinction entre choc de productivité et choc de demande

Un autre apport de l'approche multi-agent est de pouvoir modéliser des entités qui sont elles même des constructions à partir d'autres entités du modèle. Une avancée de WorkSim est ainsi d'avoir des entreprises qui peuvent avoir plusieurs postes. Cette distinction entre l'entreprise et le poste n'est pas faite dans la plupart des modèles de recherche analytique (par exemple dans les modèles présentés dans les sections 1.2.2 et 1.2.3) ou bien même dans la plupart des modèles ACE du marché du travail existant.

Ceci nous permet de faire la différence entre un choc de demande exogène lié la variation de la quantité demandée à l'entreprise et un choc de productivité sur un de ses postes. Ces chocs de productivité sur les postes sont partiellement endogènes dans le modèle. Ils peuvent être dus à des modifications de productivité liées aux caractéristiques du salarié (expérience, motivation) et/ou à des évaluations imparfaites des employés de la part de l'entreprise. Les chocs de demandes au niveau de l'entreprise permettent d'expliquer certains flux sur le marché du travail comme les fins de certains contrats, les licenciements économiques, et les créations d'emploi. Tandis que les chocs de productivité sur les postes permettent d'expliquer les licenciements pour motif personnel, les promotions et certaines embauches.

7.2.1.5 Modélisation des différents effets des CDD sur le marché du travail

Le modèle WorkSim est capable de prendre en compte en même temps les principaux effets des CDD mentionnés dans la littérature, *l'effet de rotation*, *l'effet de selection*, *l'effet tremplin* et *l'effet tampon*. Pour la première fois, un modèle économique intègre tous ces éléments en même temps. C'est en effet un avantage de l'approche multi-agent de pouvoir prendre en compte simultanément un grand nombre de mécanismes complexes qui vont dans des sens opposés.

7.2.1.6 Apport pour l'évaluation de politiques publiques

L'approche multi-agent permet de modéliser de façon fine les institutions du marché du travail (délai de carence, délai de préavis, indemnités de licenciement, etc.). Elle permet aussi de saisir des éléments difficilement modélisables par d'autres approches, comme la transmission du capital humain entre un senior et un junior dans le cas du contrat de génération. Le modèle permet de mesurer des effets d'éviction liés à une politique publique, tant au niveau des effets agrégés, qu'au niveau des trajectoires individuelles.

7.2.2 Apports pour les systèmes multi-agents

Nous avons développé une architecture d'agent cognitif qui pourrait être utilisée pour d'autres applications du domaine des systèmes multi-agents.

7.2.2.1 Modélisation avec une machine à état

Concernant la modélisation des décisions des individus, nous utilisons le principe d'une *machine à état* avec des agents qui prennent des décisions en rationalité limitée pour changer de situation. Ce processus cognitif se fait en deux temps. Tout d'abord, l'individu calcule les utilités de chaque état qu'il peut atteindre : la fonction d'utilité consiste en une agrégation de plusieurs caractéristiques pondérées par un facteur de préférence spécifique à chaque individu. Puis une fois qu'il a évalué ces niveaux d'utilités, l'individu les compare de façon séquentielle pour savoir s'il a intérêt à changer d'état.

Ce processus permet une représentation simple des choix d'un individu entre un nombre fini d'états possibles suivant le principe de seuils de satisfaction (*Satisficing*) de (Simon, 1956). Pour effectuer ces choix, l'individu évalue les états possibles avec une fonction d'agrégation qui dépend de ses préférences.

7.2.2.2 Modélisation des anticipations à horizon fini

Nous avons mis au point un processus d'anticipation à horizon fini qui est au cœur des décisions des firmes dans le modèle. L'idée centrale est que l'entreprise estime des facteurs d'aléa et de tendance de sa demande à partir de son historique. À partir de ces facteurs, elle projette trois scénarios possibles d'évolution de sa demande (positif, neutre et négatif). Lors de la création d'un nouveau contrat, par exemple, l'employeur effectue ensuite une moyenne pondérée des profits dans chaque scénario. Cette modélisation est *une alternative à l'introduction de mécanismes d'apprentissage* qu'il serait difficile à mettre en œuvre dans ce cas pour deux raisons : d'une part, le nombre d'états possibles pour une firme est très important, et d'autre part, les firmes ne rencontrent pas assez d'événements pour que l'apprentissage soit pertinent. Par exemple, les licenciements économiques sont rares, et il serait très long d'apprendre le coût d'un licenciement économique par essai et erreur. La firme projette plutôt des scénarios qui lui permette d'évaluer le risque et le coût d'un licenciement, sans en avoir forcément déjà vécu un. Notre mécanisme décisionnel est donc tourné vers l'avenir plutôt que vers le passé. Il tient compte aussi de la *situation présente* de la firme. Il permet une réaction plus rapide de l'entreprise à un changement de l'environnement, par exemple à une modification de la volatilité de sa demande (cf. section 5.4.3.3) ou un changement institutionnel (cf. section 34).

7.2.3 Apports pour la méthodologie de calibration d'une simulation multi-agent

Un autre aspect que nous avons abordé dans cette thèse est la question de la calibration et de la validation d'un modèle multi-agent avec un aussi grand nombre de paramètres (91).

Nous avons choisi de fixer une partie des paramètres (31) à partir d'études empiriques ou bien d'ordres de grandeur qui nous semble *raisonnables*. Pour les 60 paramètres restants, nous

utilisons une méthode de calibration automatique de façon à reproduire un grand nombre de caractéristiques jugées importantes du marché du travail pour une année de référence, ainsi qu'un grand nombre de flux du marché du travail pour avoir une dynamique interne du modèle la plus réaliste possible. Ce principe de calibrage sur un très grand nombre de cibles à tous les niveaux n'avait encore jamais été mis en œuvre, à notre connaissance, pour calibrer un modèle multi-agent en économie. Nous utilisons une méthode agrégée en construisant une fonction de *fitness*, qui est la somme pondérée des écarts relatifs au carré entre les cibles de la calibration et les sorties du modèle. Le problème revient donc à un problème d'optimisation mono-objectif de cette fonction de *fitness*.

Pour résoudre ce problème nous utilisons l'algorithme évolutionnaire CMA-ES. Cet algorithme présente deux caractéristiques qui le rend pertinent pour la calibration d'une simulation multi-agent avec de très nombreux paramètres :

- d'une part, grâce à l'utilisation d'une matrice de covariance adaptée pas à pas, l'algorithme est capable de détecter rapidement les corrélations entre les très nombreux paramètres
- il s'appuie sur un mécanisme de classement des solutions obtenues et non pas sur leurs valeurs, ce qui rend l'algorithme plus résistant face aux aléas stochastiques à chaque évaluation de la fonction de *fitness*

Ensuite, nous avons mis au point un protocole de calibration en deux temps. L'idée est effectuer une sauvegarde du modèle une fois le modèle stabilisé et calibré sur l'année de référence. Cette sauvegarde sert de référence pour la calibration suivante. Elle permet de définir un point d'initialisation pour les analyses ultérieures du modèle.

La méthode de calibration que nous avons développée pourrait être réutilisée pour calibrer un autre système multi-agent.

7.3 Limites et perspectives

Dans cette partie, nous présentons les limites de ce travail et les perspectives envisageables en prolongement direct de cette thèse suivant 3 principaux axes :

- la méthode de calibration et de validation
- l'analyse du modèle
- l'ajout de nouveaux éléments dans le modèle

7.3.1 Limites de la méthode de calibration

7.3.1.1 Utiliser une approche multi-objectif

Le nombre de cibles est très important et il est très difficile de faire émerger toutes ces cibles simultanément. C'est un problème multi-objectif et la solution que l'on obtient apparaît comme un compromis entre les cibles suivant les pondérations que l'on a retenues. Pour explorer d'avantage l'espace des solutions possibles de ce problème de calibration, il serait intéressant de mettre en œuvre un approche de calibration multi-objectif.

Cependant cette méthode est très longue à mettre en œuvre en pratique même pour une calibration d'un modèle multi-agent avec peu de paramètres (par exemple dans (Schmitt C, 2014) il a fallu 500 000 simulations pour explorer un modèle avec 5 paramètres et 3 cibles. Pour notre modèle avec 63 cibles de calibration et 60 paramètres, le problème devient en pratique très difficile à résoudre et à représenter. C'est un véritable enjeu d'explorer un modèle multi-agent aussi complexe que WorkSim.

7.3.1.2 Modéliser un environnement non-stationnaire

Nous avons choisi de calibrer notre modèle en état stationnaire pour l'année de référence 2011. Cette méthode permet d'évaluer des politiques de l'emploi "toutes choses égales par ailleurs". Ce choix est cependant une approximation, car cet état stationnaire n'existe pas dans la réalité. Le marché du travail réel évolue de façon dynamique. Les flux du marché du travail en 2011 amènent à la situation du marché du travail en 2012 et ainsi de suite.

Une modélisation dynamique du marché du travail sur plusieurs années en environnement non-stationnaire serait une extension du modèle. Il faudrait modéliser de façon fine l'impact de la démographie, mais aussi, notamment, les variations de la demande extérieure. C'est un exercice beaucoup plus difficile, mais qui devra être résolu pour pouvoir effectuer des prévisions à plus ou moins long terme avec ce type de modèle.

7.3.1.3 Introduire des paramètres adaptatifs ?

Une fois les paramètres du modèle déterminés avec cette méthode de calibration, nous supposons qu'ils ne changent pas lorsque nous effectuons une analyse de variante du modèle. Par exemple, le paramètre ω_{-1} , le poids du scénario pessimiste dans l'anticipation de la demande, reste à sa valeur de 78.9% pour toutes les variantes de politiques publiques que nous avons testées. On peut se demander si cette valeur doit changer ? Est-ce que les employeurs deviennent moins pessimistes si une politique favorisant les entreprises est menée ? Une extension du modèle serait dans ce cas de rendre ce paramètre ω_{-1} endogène dans le modèle. Par exemple, si le climat des affaires s'améliore, la pondération du scénario pessimiste dans l'évaluation de la demande pourrait changer. Pour modéliser cette adaptation, cela nécessite cependant d'introduire d'autres mécanismes et paramètres sous-jacents.

7.3.1.4 Mieux microfonder le modèle

On a vu que ce modèle comporte un très grand nombre de paramètres. La calibration est un processus délicat, car il est difficile de trouver les valeurs des paramètres qui permettent de reproduire simultanément les données agrégées et la réalité des comportements microéconomiques des agents. Un certain nombre de nos paramètres sont fixés selon des *a priori* raisonnables. Idéalement, il faudrait pouvoir préciser les valeurs de tous les paramètres à partir de résultats d'enquêtes sur le terrain. Il serait aussi pertinent d'utiliser des données individuelles précises comme celles utilisées par les modèles de microsimulation de façon à reproduire de façon plus réaliste la diversité des profils des agents, individus comme entreprises. Avec l'amélioration des capacités de calculs des ordinateurs, il sera sûrement possible

un jour de construire un modèle à l'échelle 1 de la France avec la représentation précise des caractéristiques de chaque individu et de chaque entreprise.

Cependant, si tous les paramètres du modèle sont estimés à partir de données microéconomiques, il y a peu de chance que les résultats agrégés obtenus avec la simulation coïncident avec les données agrégées du système réel, car il est impossible de reproduire la diversité des comportements et des interactions possibles qui existent dans la réalité (par définition d'un système complexe). Peut-on alors se passer d'une méthode de calibration indirecte des paramètres ? Il semble qu'il y ait toujours un compromis à réaliser entre le réalisme au niveau microscopique des comportements des agents et la qualité descriptive des sorties de la simulation au niveau macroscopique.

7.3.1.5 Le problème d'échelle

Un autre problème qui se pose est l'effet d'échelle. Nous avons utilisé un nombre limité d'agents dans WorkSim, de façon à réduire le temps d'une simulation, pour que le processus de calibration ne soit pas trop long. Nous travaillons avec environ 800 firmes et nous n'avons qu'une seule entreprise avec plus de 300 salariés. Ceci est une limite pour modéliser des phénomènes de concurrence entre grandes firmes et pour modéliser les marchés internes de l'emploi. Il faudrait pouvoir travailler avec plus d'agents et pour cela il faudrait optimiser le temps de la simulation en travaillant avec un langage de programmation plus performant et/ou améliorer le processus de calibration.

7.3.2 Améliorer l'analyse du modèle

Une autre perspective concerne l'amélioration des outils d'analyse du modèle pour mieux comprendre le fonctionnement du marché du travail.

Analyser les cohortes d'agents Nous avons montré que la caractérisation du marché du travail nécessite une compréhension des trajectoires individuelles des agents pour faire la distinction entre la segmentation temporaire et la segmentation permanente. Pour cette étude, des analyses empiriques peuvent servir de référence, mais elles ne sont pas capables de reproduire des carrières complètes de cohortes, à cause d'un manque de données individuelles sur une très longue période. Un modèle multi-agent semble donc un outil essentiel dans ce domaine pour vraiment caractériser le marché du travail. Avec l'étude du contrat de génération, nous avons illustré les possibilités du modèle sur ce sujet. Il apparaît notamment que l'analyse de cohortes permet d'analyser plus finement les effets d'éviction d'une politique publique. Cette analyse des trajectoires des agents pourrait être réalisée avec des cartes de Kohonen (Grelet, 2002) qui permet de réaliser une typologie des parcours des agents sur le marché du travail.

Effectuer des analyses croisées de sensibilité des paramètres Pour l'analyse du modèle, nous avons seulement calculé les signatures individuelles des paramètres. Pour explorer plus en détail les dynamiques du modèle, il pourrait être intéressant de réaliser des analyses croisées de sensibilité en faisant varier plusieurs paramètres simultanément.

Exploration des données de la simulation De façon plus générale, un enjeu de la simulation avec un système multi-agent est la question de l'exploitation des nombreuses données en sortie du modèle. Comment développer des méthodes de fouille de données (*data mining*) pour en déduire des résultats pertinents pour la compréhension du système étudié ?

7.3.3 Compléter le modèle

Pour l'étude d'un système complexe comme le marché du travail, un modèle ne peut pas être parfaitement complet. Il manque toujours des éléments. Toutefois, un avantage de l'approche multi-agent est de permettre une conception modulaire et incrémentale, donc il est possible de compléter le modèle au fur et à mesure, mais la difficulté est de maintenir la cohérence du modèle. Par exemple, lorsque l'on ajoute un nouvel élément du marché du travail, comme un nouveau contrat, il faut que les agents le prennent en compte aussi dans leurs mécanismes décisionnels.

7.3.3.1 Prise en compte de nouveaux éléments du marché du travail

L'interim Nous souhaitons intégrer le travail intérimaire, qui s'insérera dans un triple choix complètement endogène des entreprises entre CDD, CDI et Intérim. Cette intégration dans le processus d'évaluation de la firme peut être faite facilement, car l'algorithme d'évaluation d'un contrat que nous avons conçu est générique, et facilement transposable pour évaluer un nouveau contrat. Il faudra cependant modéliser un nouvel acteur du marché du travail, l'entreprise de travail temporaire, qui joue un rôle intéressant d'intermédiaire sur le marché. Cet intermédiaire apporte de la flexibilité aux entreprises en contrepartie d'un coût supplémentaire.

Les ruptures conventionnelles Dans la version actuelle du modèle, nous assimilons les ruptures conventionnelles de CDI à des licenciements pour motif personnel. Une extension de WorkSim serait de prendre en compte cette rupture conventionnelle qui est une procédure qui permet à l'employeur et au salarié de convenir en commun de la rupture du contrat de travail. La prise en compte de cette rupture conventionnelle nécessite donc de modéliser une négociation, avec un arbitrage à faire par les deux parties.

7.3.3.2 Ajouter des réseaux sociaux

Actuellement dans WorkSim, la diffusion de l'information, notamment à propos des offres d'emploi se fait avec des processus aléatoires. Il serait pertinent d'ajouter des réseaux sociaux. (Tassier et Menczer, 2001; Thiriot *et al.*, 2011) mettent en évidence l'importance de la notion de diffusion de l'information via un réseau d'interaction sur le marché du travail. Cette notion permet de mieux modéliser des phénomènes de ségrégation sur le marché du travail.

7.3.3.3 Développer le protocole de recrutement

Actuellement, un individu postule à la meilleure offre qui dépasse son utilité de réservation. Pour être plus réaliste, le protocole pourrait être amélioré en offrant la possibilité

aux chercheurs d'emploi d'effectuer des candidatures multiples. En fonction de toutes les réponses que le candidat reçoit, il choisit ensuite la meilleure offre. Le protocole devient cependant plus complexe, car du côté des entreprises, les individus sélectionnés peuvent alors refuser des offres pour lesquelles ils ont été acceptés. A chaque période, pendant le processus de recrutement, il faudrait mettre en place un mécanisme d'affectation séquentiel qui tient compte de l'ordre des vœux des chercheurs d'emploi et des entreprises.

7.3.3.4 Modélisation avec des décisions rationnelles à la place de "boîtes noires"

Les départs à la retraite Les départs à la retraite des individus sont modélisés avec des probabilités exogènes calculées de façon à conserver le nombre de retraités constant dans la simulation par tranche d'âge de cinq ans. Une extension du modèle serait de rendre endogènes ces départs à la retraite de façon à analyser plus finement le marché des seniors.

Les sorties des études De la même façon, les sorties des études se font dans WorkSim avec un mécanisme "boîte noire". Il faudrait rendre endogène ce choix de sortir des études. Un autre aspect serait aussi de modéliser les diplômes obtenus lors de ces études. Ces diplômes conditionnent en effet les perspectives de carrières des individus sur le marché du travail.

Le module démographique Le module démographique que nous avons intégré dans WorkSim est très sommaire. Il pourrait être amélioré en utilisant des données démographiques disponibles plus précises sur le recensement de la population et sur les ménages.

7.3.3.5 Modélisation des compétences et des tâches

Actuellement, la production dans l'entreprise est modélisée par une unique fonction. Une extension du modèle serait d'améliorer la modélisation de la production dans l'entreprise avec l'introduction de compétences et de tâches plus spécifiques. Les compétences de chaque individu pourraient être définies par exemple sous la forme d'un vecteur. Chaque coordonnée du vecteur représente une compétence spécifique qui peut être utile pour réaliser une tâche, par exemple, la faculté de savoir programmer. De façon symétrique, une tâche serait représentée par un vecteur de compétences requises. Ces éléments permettraient de mieux modéliser l'organisation dans l'entreprise, car pour réaliser certaines tâches il faudrait exploiter des compétences détenues par différents agents. On pourrait introduire aussi des compétences spécifiques de chef de projet, qui ne permettent pas de produire à proprement parler, mais d'encadrer les équipes. Cette modélisation permettrait de mieux spécifier les besoins en formation dans l'entreprise et les compétences acquises pendant les études.

7.3.3.6 Vers un bouclage macroéconomique de WorkSim

Notre modèle du marché du travail évolue en vase clos. Il n'y a pas de bouclage macroéconomique. Ceci a des conséquences sur l'impact des politiques économiques que l'on peut mener avec WorkSim, notamment sur les politiques qui portent sur les revenus du travail, car nos agents ne consomment pas. Il faudrait intégrer WorkSim dans un modèle macroéconomique complet et éventuellement déjà développé par une autre équipe. (Assenza et

Gatti, 2013) montrent qu'une première approche peut être de réaliser un modèle hybride qui consiste à intégrer un modèle multi-agent dans un modèle macroéconomique classique. A terme, de façon à être parfaitement cohérent, il faudrait bien sûr développer un modèle multi-agent macroéconomique complet qui intègre WorkSim.

7.4 Extensions

Application à un autre pays Le modèle est conçu pour être générique et être applicable à un autre pays. Néanmoins, nous montrons dans l'annexe J avec l'exemple du marché sénégalais qu'il y a besoin de nouvelles données et que des adaptations sont nécessaires pour rendre compte de nouveaux aspects qui n'existent pas sur le marché du travail français. Le marché du travail sénégalais est en effet caractérisé par un important secteur informel que nous n'avons pas modélisé dans le cas de la France. A ce stade, nous avons souhaité initier un travail similaire à WorkSim au Sénégal. Toutefois, de nombreuses questions de modélisation restent à étudier.

Développer un modèle multi-pays L'économie est de plus en plus mondialisée et les politiques publiques menées pour un pays peuvent avoir des conséquences sur les marchés du travail des autres pays. Des politiques qui jouent sur les coûts du travail par exemple peuvent mener à des délocalisations. Il y a aussi des phénomènes d'émigration de travailleurs.

Pour cela, il faudrait, dans l'idéal, développer un modèle avec les marchés du travail et les institutions détaillés de tous les pays. Il existe déjà un modèle ACE multi-pays qui modélise l'économie européenne, EURACE (Dawid *et al.*, 2012), mais ce dernier ne développe pas en détail le marché du travail.

Couplage de modèles Un autre enjeu est lié à la question des couplages de modèles. Comment en effet réutiliser des éléments qui ont été développés dans d'autres modèles? Comment intégrer le modèle WorkSim dans un modèle multi-agent macroéconomique plus vaste? La difficulté est que les modélisateurs utilisent des langages de programmation, des plateformes de simulation et des formalismes différents. Il faudrait alors définir des standards pour la modélisation multi-agent en économie.

Un outil d'aide à la décision politique Une dernière question est liée à l'utilisation de ce type de modèle : est-t-il possible de faire des prévisions fiables avec ce type de modèle? Et si oui, à quel horizon? Voilà un des enjeux des modèles multi-agents pour convaincre les régulateurs de les utiliser pour mettre en œuvre de façon concrète des politiques économiques.

Bibliographie

- (2010). L'économie de a à z. *Le dictionnaire d'Alternative Economique*.
- (2011). Deuxième enquête de suivi de la pauvreté au Sénégal. *Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie*.
- (2011). Revue technique et institutionnelle comparée des Systèmes d'Information sur le Marché du Travail du Bénin, Burkina Faso, Mali et Sénégal. *AFRISTAT*.
- (2012). Net recul des exonérations en 2011. *ACOSSTAT*, (164).
- ABOWD, J. M., KRAMARZ, F. et MARGOLIS, D. N. (1999). High wage workers and high wage firms. *Econometrica*, 67(2):251–333.
- ACEMOGLU, D. et PISCHKE, J.-S. (1998). The structure of wages and investment in general training. Rapport technique, National Bureau of Economic Research.
- ACOSS (2011). Les déclarations d'embauche entre 2000 et 2010 : une évolution marquée par la progression des cdd de moins d'un mois. (143).
- ADDISON, J. T., CENTENO, M. et PORTUGAL, P. (2009). Do reservation wages really decline? some international evidence on the determinants of reservation wages. *Journal of Labor Research*, 30(1):1–8.
- AKERLOF, G. A. (1984). Gift exchange and efficiency-wage theory : Four views. *The American Economic Review*, pages 79–83.
- AKERLOF, G. A., SHILLER, R. J. et VIETOR, M. (2009). *Animal spirits*. Brilliance Audio.
- ARROW, K. J. (1962). The economic implications of learning by doing. *The review of economic studies*, pages 155–173.
- ASSEMBLÉE-NATIONALE (2012). Projet de loi portant création du contrat de génération. étude d'impact.
- ASSEMBLÉE-NATIONALE (2014). Rapport sur l'impact sociétal, social, économique et financier de la réduction progressive du temps de travail.
- ASSENZA, T. et GATTI, D. D. (2013). E pluribus unum : Macroeconomic modelling for multi-agent economies. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 37(8):1659–1682.
- AUGER, A. et HANSEN, N. (2012). Addressing numerical black-box optimization : CMAE-ES. *LION 6, January 16-20, Paris, France*.
- BALLOT, G. (1981). Marché du travail et dynamique de la répartition des revenus salariaux. *Thèse pour le doctorat d'Etat d'Economie, Université Paris X-Nanterre*.

- BALLOT, G. (2002). Modeling the labor market as an evolving institution : model artemis. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 49(1):51–77.
- BALLOT, G., MANDEL, A. et VIGNES, A. (2014). Agent-based modeling and economic theory : where do we stand? *Journal of Economic Interaction and Coordination*, pages 1–23.
- BALLOT, G. et TAYMAZ, E. (1997). The dynamics of firms in a micro-to-macro model : The role of training, learning and innovation. *Journal of evolutionary economics*, 7(4):435–457.
- BALLOT, G. et TAYMAZ, E. (2001). Training policies and economic growth in an evolutionary world. *Structural Change and Economic Dynamics*, 12(3):311–329.
- BANQUE MONDIALE (2007). A la recherche de l'emploi - le chemin vers la prospérité. *Banque Mondiale*.
- BARDAJI, J., SÉDILLOT, B. et WALRAET, E. (2003). Un outil de prospective des retraites : le modèle de microsimulation destinée.
- BARLET, M., BLANCHET, D. et LE BARBANCHON, T. (2009). Microsimulation et modèles d'agents ; une approche alternative pour l'évaluation des politiques d'emploi. *Economie et Statistique*, pages 429–430, 51–76.
- BAZILLIER, R. La théorie de la recherche d'emploi. cours d'économie du travail. Rapport technique.
- BECKER, G. S. (1975). Investment in human capital : effects on earnings. In *Human Capital : A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education, 2nd ed.*, page 13–44. NBER.
- BEFFY, M., BUCHINSKY, M., FOUGÈRE, D., KAMIONKA, T. et KRAMARZ, F. (2006). The returns to seniority in france (and why are they lower than in the united states ?).
- BENTOLILA, S. et BERTOLA, G. (1990). Firing costs and labour demand : how bad is euroclerosis? *The Review of Economic Studies*, 57(3):381–402.
- BENTOLILA, S., CAHUC, P., DOLADO, J. J. et LE BARBANCHON, T. (2010). Two-tier labor markets in the great recession : France vs. spain. Rapport technique, Discussion paper series//Forschungsinstitut zur Zukunft der Arbeit.
- BERCHE, K., HAGNERÉ, C. et VONG, M. (2011). Les déclarations d'embauche entre 2000 et 2010 : une évolution marquée par la progression des CDD de moins d'un mois. *Acosse Stat*, (143).
- BERGMANN, B. R. (1974). A microsimulation of the macroeconomy with explicitly represented money flows. In *Annals of Economic and Social Measurement, Volume 3, number 3*, pages 475–489. NBER.
- BERSON, C. et FERRARI, N. (2013). Réduire la segmentation du marché du travail par des incitations financières? DG Trésor 2013/04, DG Trésor.
- BISCOURP, P., DESSY, O., FOURCADE, N. et KEMPF, H. (2005). Les salaires sont-ils rigides ? le cas de la france à la fin des années 1990 ; suivi d'un commentaire de hubert kempf. *Economie et statistique*, 386(1):59–89.
- BLANCHARD, O. et LANDIER, A. (2002a). The perverse effects of partial labour market reform : fixed-term contracts in france. *Economic Journal*, 112(480).

- BLANCHARD, O. et LANDIER, A. (2002b). The perverse effects of partial labour market reform : fixed-term contracts in france. *The Economic Journal*, 112(480):F214–F244.
- BLANCHFLOWER, D. G. et OSWALD, A. J. (1994). *The wage curve*. The MIT Press.
- BOCCANFUSO, D., CABRAL, F., CISSÉ, F., DIAGNE, A. et SAVARD, L. (2007). Stratégies de réduction de la pauvreté au sénégal : une analyse par la modélisation en équilibre général calculable microsimulé. *L'Actualité économique*, 83(4):483–528.
- BOOTH, A. L., FRANCESCONI, M. et FRANK, J. (2002). Temporary jobs : stepping stones or dead ends? *The economic journal*, 112(480):F189–F213.
- BOYER, R. (2006). La flexisécurité danoise : quels enseignements pour la france? *Opuscules du CEPREMAP*.
- BUCHER, A. (2010). Hiring practices, employment protection and temporary jobs. Paper 2010-13, TEPP Working Papers.
- BUNEL, M. (2007). *Analyser la relation entre CDD et CDI : emboitement et durée des contrats*. Centre d'études de l'emploi.
- CAHUC, P. (2014). Search, flows, job creations and destructions.
- CAHUC, P. et CARCILLO, S. (2014). Alléger le coût du travail pour augmenter l'emploi : les clefs de la réussite. *Institut Montaigne*. See also Plane M. (2012) : "Évaluation de l'impact économique du CICE", *Revue de l'OFCE (French Economic Observatory)*, (126).
- CAHUC, P., CARCILLO, S. et ZIMMERMAN, K. (2013). L'emploi des jeunes peu qualifiés en france. *CAE*, (4).
- CAHUC, P., CARCILLO, S., ZYLBERBERG, A. et MCCUAIG, W. (2014). *Labor economics*. MIT press.
- CALVEZ, B., HUTZLER, G. et al. (2007). Ant colony systems and the calibration of multi-agent simulations : a new approach. *In Multi-Agents for modelling Complex Systems (MA4CS'07) Satellite Workshop of the European Conference on Complex Systems 2007 (ECCS'07)*.
- CAMARA, N. et GUEYE, A. (2013). Déterminants de l'accès à l'emploi au sénégal.
- CARD, D. et HYSLOP, D. (1997). Does inflation "grease the wheels of the labor market"? *In Reducing inflation : Motivation and strategy*, pages 71–122. University of Chicago Press.
- CHANG, M.-H. (2011). Agent-based modeling and computational experiments in industrial organization : Growing firms and industries in silico. *Eastern Economic Journal*, 37(1):28.
- CHETTY, R. (2008). Moral hazard vs. liquidity and optimal unemployment insurance. Rapport technique, National Bureau of Economic Research.
- COE (2013). Emplois durablement vacants et difficultés de recrutement. Rapport technique.
- COGNEAU, D., RAZAFINDRAKOTO, M. et ROUBAUD, F. (1996). Le secteur informel urbain et l'ajustement au cameroun. *Revue d'économie du développement*, (3):27–63.
- COUR DE CASSATION (2008). Diffusion de jurisprudence, doctrine et communications. *Bulletin d'information*, (678).
- CYRIL, N. et BENOÎT, O. (2012). Les allègements de cotisations sociales patronales sur les bas salaires en France de 1993 à 2009. *Trésor-Eco*, (97).

- DARES (2013a). La durée du travail des salariés à temps complet. *DARES Analyses*, (047).
- DARES (2013b). Le temps partiel en 2011. *DARES Analyses*, (005).
- DARES (Octobre 2012). Les mouvements de main-d'oeuvre en 2011. *DARES Analyses*, (71).
- DAWID, H., GEMKOW, S., HARTING, P. et NEUGART, M. (2009). On the effects of skill upgrading in the presence of spatial labor market frictions : an agent-based analysis of spatial policy design. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(4):5.
- DAWID, H., GEMKOW, S., HARTING, P., Van der HOOG, S. et NEUGART, M. (2012). The eurace@unibi model : An agent-based macroeconomic model for economic policy analysis.
- DE FROMENT, C. (2012). Pour une flexibilité responsable. *Sociétal*, (75):112–119.
- DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S. et MEYARIVAN, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : Nsga-ii. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2):182–197.
- DECALUWÉ, B., DUMONT, J.-C., SAVARD, L. *et al.* (1999). Mesurer la pauvreté et les inégalités dans un modèle d'équilibre général calculable. Rapport technique.
- DEMAZEAU, Y. et COSTA, A. R. (1996). Populations and organizations in open multi-agent systems. *In Proceedings of the 1st National Symposium on Parallel and Distributed AI*, pages 1–13.
- DERVEEUW, J., BEAUFILS, B., MATHIEU, P. et BRANDOUY, O. (2007). Un modèle d'interaction réaliste pour la simulation de marchés financiers. *Actes des 4e Journées Francophones sur les Modèles Formels de l'Interaction (MFI'07)*, pages 103–112.
- DIAMOND, P. A. (1971). A model of price adjustment. *Journal of economic theory*, 3(2):156–168.
- DOCQUIER, F. et MARFOUK, A. (2004). Measuring the international mobility of skilled workers (1990-2000) : release 1.0. *World Bank Policy Research Working Paper*, (3381).
- DOERINGER, P. B. et PIORE, M. J. (1985). *Internal Labor Markets and Manpower Analysis*. M.E. Sharpe.
- DRAGO, R. et TURNBULL, G. K. (1988). Individual versus group piece rates under team technologies. *Journal of the Japanese and International Economies*, 2(1):1–10.
- EL FALLAH SEGHROUCHNI, A. et BRIOT, J.-P. (2009). Technologies des systemes multi-agents et applications industrielles. *Collection IC2. Hermes/Lavoisier*.
- ELIASSON, G. (1977). A micro-to-macro model of the swedish economy. *IUI, Stockholm*.
- FACCINI, R. (2008). Reassessing labor market reforms : Temporary contracts as a screening device. Working paper, European University Institute.
- FAGIOLO, G., DOSI, G. et GABRIELE, R. (2004). Matching, bargaining, and wage setting in an evolutionary model of labor market and output dynamics. *Advances in Complex Systems*, 7(02):157–186.
- FERBER, J. (1999). *Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence*, volume 1. Addison-Wesley Reading.

- FRANKLIN, S. et GRAESSER, A. (1997). Is it an agent, or just a program? : A taxonomy for autonomous agents. *In Intelligent agents III agent theories, architectures, and languages*, pages 21–35. Springer.
- GAROCHE, B. et GOIN, A. (2015). Les accords et plans d'action relatifs au contrat de génération.
- GÉNÉREUX, J. (2001). *Introduction à l'économie*. Ed. du Seuil.
- GNILOMEDOV, I. et NIKOLENKO, S. (2010). Agent-based economic modeling with finite state machines. *In Combined Proceedings of the International Symposium on Social Network Analysis and Norms for MAS*, pages 28–33. Citeseer.
- GOLDSMITH, P. D., GUNJAL, K. et NDARISHIKANYE, B. (2004). Rural–urban migration and agricultural productivity : the case of senegal. *Agricultural economics*, 31(1):33–45.
- GOUDET, O., KANT, J.-D. et BALLOT, G. (2015). Forbidding fixed duration contracts : Unfolding the opposing consequences with a multi-agent model of the french labor market. *In Advances in Artificial Economics*, pages 151–167. Springer.
- GOURIEROUX, C., MONFORT, A. et RENAULT, E. (1993). Indirect inference. *Journal of applied econometrics*, 8:S85–S85.
- GRAZZINI, J. et RICHIARDI, M. (2015). Estimation of ergodic agent-based models by simulated minimum distance. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 51:148–165.
- GRELET, Y. (2002). *Des typologies de parcours : méthodes et usages*. CEREQ.
- GUYOT, P. et HONIDEN, S. (2006). Agent-based participatory simulations : Merging multi-agent systems and role-playing games. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(4).
- HANSEN, N. et OSTERMEIER, A. (2001). Completely derandomized self-adaptation in evolution strategies. *Evolutionary computation*, 9(2):159–195.
- HARRIS, J. R. et TODARO, M. P. (1970). Migration, unemployment and development : a two-sector analysis. *The American economic review*, pages 126–142.
- HEIDRICH-MEISNER, V. et IGEL, C. (2009). Neuroevolution strategies for episodic reinforcement learning. *Journal of Algorithms*, 64(4):152–168.
- HENDERSON, J. M. Q., HENDERSON, R. E. J. M. et QUANDT, R. E. (1971). Microeconomic theory a mathematical approach. Rapport technique.
- HOLLAND, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
- HOLMSTROM, B. et MILGROM, P. (1991). Multitask principal-agent analyses : incentive contracts, asset ownership, and job design. *J. Law Econ. Org*, page 24–52.
- HOMMES, C. H. (2006). Heterogeneous agent models in economics and finance. *Handbook of computational economics*, 2:1109–1186.
- IFOP (2015). Les priorités des français et la question de l'immigration.
- INSEE (2008). Population active à la recherche d'un autre emploi (PARAE). (87).
- INSEE (2011a). Actifs occupés selon le sexe, l'âge regroupé et la catégorie socioprofessionnelle détaillée. Rapport technique.

- INSEE (2011b). Décès par sexe, année de naissance, âge et état matrimonial. *Insee. Statistiques d'état civil sur les décès*.
- INSEE (2011c). Depuis 11 ans, moins de tâches ménagères, plus d'internet. *INSEE PREMIERE*.
- INSEE (2011d). Entreprises selon le nombre de salariés et l'activité en 2011.
- INSEE (2011e). Evolution générale des salaires et cotisations (source législation sociale).
- INSEE (2011f). Le passage de l'emploi à la retraite. *INSEE Première*.
- INSEE (2011g). Population des ménages par sexe, âge et mode de cohabitation en 2011. *INSEE : recensement de la population française en 2011*.
- INSEE (2011h). Pyramide des âges au 1er janvier 2011 - france métropolitaine. Rapport technique.
- INSEE (2011i). Salaire moyen en équivalent temps plein. *Insee*.
- INSEE (2011j). Statut et type de contrat selon l'âge en 2011. Rapport technique.
- INSEE (2011k). Taux d'activité selon le sexe et la configuration familiale en 2011.
- INSEE (2011l). Taux de chômage par âge en 2011.
- INSEE (2011m). Taux de scolarisation par âge en 2011.
- INSEE (2011). Transitions entre l'emploi et le chômage en 2011.
- INSEE (2011). Une photographie du marché du travail en 2011.
- INSEE (2013a). Fiches thématiques - Synthèse des actifs occupés - Emploi et salaires - Insee Références - Édition 2013.
- INSEE (2013b). L'emploi dans la fonction publique en 2011. (1460).
- INSEE (2013c). Montant mensuel net du smic.
- JIN, R. L., SHAH, C. P. et SVOBODA, T. J. (1995). The impact of unemployment on health : a review of the evidence. *CMAJ : Canadian Medical Association Journal*, 153(5):529.
- JOVANOVIC, B. (1979). Job matching and the theory of turnover. *The Journal of Political Economy*, page 972–990.
- KAMALI, B., MOUSAVI, S. J. et ABBASPOUR, K. (2013). Automatic calibration of hec-hms using single-objective and multi-objective pso algorithms. *Hydrological Processes*, 27(26):4028–4042.
- KANT, J.-D. (2012). Apports de l'informatique et des mathématiques pour la modélisation en sciences humaines et sociales. *Mathématiques et Sciences Humaines*, 197:47–64.
- KENNEDY, J. (2010). Particle swarm optimization. *In Encyclopedia of Machine Learning*, pages 760–766. Springer.
- KLÜGL, F. (2008). A validation methodology for agent-based simulations. *In Proceedings of the 2008 ACM symposium on Applied computing*, pages 39–43. ACM.
- LE MOIGNE, J.-L. (1990). La modélisation des systèmes complexes. *Paris : Bordas, Dunot, 1990*, 1.
- LESNE, A. (2009). Biologie des systèmes : l'organisation multiéchelle des systèmes vivants. *M/S Revues : Dossier Biologie des systèmes*.

- LEWKOVICZ, Z. (2010). *Modélisation et simulation du marché du travail avec un système multi-agents*. Thèse de doctorat, Paris 6.
- LOTKA, A. J. (1925). Elements of physical biology.
- MAROUANI, M. A. (2000). Ouverture commerciale et emploi : un modèle d'équilibre général avec salaires d'efficience appliqué à la tunisie. *Revue économique*, pages 557–569.
- MAROUANI, M. A. (2002). Imperfections du marché du travail et modèles d'équilibre général calculables : une revue de littérature.
- MCCALL, J. J. (1970). Economics of information and job search. *The Quarterly Journal of Economics*, pages 113–126.
- MIGNOT, S., TEDESCHI, G. et VIGNES, A. (2012). An agent based model of switching : the case of boulogne s/mer fish market. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 15(2):3.
- MONSO, O. (2006a). Changer de groupe social en cours de carrière. *INSEE PREMIERE*.
- MONSO, O. (2006b). Quand la formation continue. *Céreq*.
- MORTENSEN, D. et PISSARIDES, C. (1994). Job creation and job destruction in the theory of unemployment. *The review of economic studies*, 61(3):397–415.
- MORTENSEN, D. T. (1970). Job search, the duration of unemployment, and the phillips curve. *The American Economic Review*, pages 847–862.
- MUNOZ PEREZ, B. et SERVERIN, E. (2005). Le droit du travail en perspective contentieuse. 1993 à 2004. Rapport technique, Rapport du ministère de la justice, Direction des affaires civiles et du sceau.
- NARZISI, G., MYSORE, V. et MISHRA, B. (2006). Multi-objective evolutionary optimization of agent-based models : An application to emergency response planning. *In Computational Intelligence*, pages 228–232.
- NDOYE, D. (1998). *La convention collective nationale interprofessionnelle du Sénégal annotée : le texte et la jurisprudence*. Editions juridiques africaines.
- NEJAT, E. et SANLI, A. (1999). Long-run growth effect of the physical capital-human capital complementarity : An approach by time series techniques.
- NEUGART, M. (2008). Labor market policy evaluation with ACE. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 67(2):418–430.
- NEUGART, M., RICHIARDI, M. *et al.* (2012). Agent-based models of the labor market. *LABORatorio R. Revelli working papers series*, 125.
- NICOT AND ROUX (2008). Pénibilité au travail. une approche par les processus d'usure et les itinéraires professionnels. *anact*.
- NIJKAMP, P. et POOT, J. (2005). The last word on the wage curve? *Journal of Economic Surveys*, 19(3):421–450.
- NORDMAN, C. J. et PASQUIER-DOUMER, L. (2014). Vocational education, on-the-job training, and labour market integration of young workers in urban west africa. *PROSPECTS*, 44(3):445–462.

- NORTH, M. J., COLLIER, N. T. et VOS, J. R. (2006). Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 16(1):1–25.
- OHADA (2010). Passer de l’informel au formel. guide pour les petits entrepreneurs.
- OKUN, A. M. (1970). The political economy of prosperit.
- OMICINI, A., RICCI, A. et VIROLI, M. (2008). Artifacts in the A&A meta-model for multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 17(3):432–456.
- OQLF (2005). Le grand dictionnaire terminologique. office québécois de la langue française.
- ORCUTT, G. H. (1957). A new type of socio-economic system. *The review of economics and statistics*, pages 116–123.
- PHELPS, E. (1970). *Microfoundations of employment and inflation theory*. Macmillan, London.
- PUBLIC, S. (2011). Allocation d’aide au retour à l’emploi (ARE) : montant et versement.
- READ, M., TRIPP, M., LEONOVA, H., ROSE, L. et TIMMIS, J. (2013). Automated calibration of agent-based immunological simulations. *In Advances in Artificial Life, ECAL*, volume 12, pages 874–875.
- RICHIARDI (2006). Toward a non-equilibrium unemployment theory. *Computational Economics*, 27:135–160.
- SABELLI, H. et KOVACEVIC, L. (2008). Biotic complexity of population dynamics. *Complexity*, 13(4):47–55.
- SAKELLARIOU, I. (2012). Agent based modelling and simulation using state machines. *In SIMULTECH*, pages 270–279.
- SAVARD, L. et MESPLÉ-SOMPS, S. (1996). Un modèle d’équilibre général calculable générique du sénégal. *Université Laval, septembre*.
- SCHMITT C, Rey-Coyrehourcq S, R. R. P. D. (2014). Half a billion simulations : evolutionary algorithms and distributed computing for calibrating the simpoplocal geographical model. *Environment and Planning B : Planning and Design advance online publication*.
- SEPPECHER, P. (2011). *Modélisation multi-agents d’une économie monétaire de production : un système dynamique et complexe d’interactions réelles et monétaires entre des agents multiples, hétérogènes, autonomes et concurrents*. Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis.
- SERVERIN, E. et VALENTIN, J. (2009). Licenciement et recours aux prud’hommes, questions de mesure. *L’emploi en ruptures, Paris, Dalloz*, page 121–138.
- SERVICE-PUBLIC.FR (2011). Revenu de solidarité active (rsa).
- SHARMA, V., SWAYNE, D. A., LAM, D. et SCHERTZER, W. (2006). Parallel shuffled complex evolution algorithm for calibration of hydrological models. *In High-Performance Computing in an Advanced Collaborative Environment, 2006. HPCS 2006. 20th International Symposium on*, pages 30–30. IEEE.

- SIMON, H. A. (1955). A behavioral model of rational choice. *The quarterly journal of economics*, 69(1):99–118.
- SIMON, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. *Psychological Review*, 63(2):129–138.
- SMITH, V. L. (1991). Rational choice : The contrast between economics and psychology. *Journal of Political Economy*, pages 877–897.
- STIGLER, G. J. (1962). Information in the labor market. *The Journal of Political Economy*, 70(5):94–105.
- STONEDAHL, F. et WILENSKY, U. (2011). Finding forms of flocking : Evolutionary search in abm parameter-spaces. In *Multi-Agent-Based Simulation XI*, pages 61–75. Springer.
- TASSIER, T. et MENCZER, F. (2001). Emerging small-world referral networks in evolutionary labor markets. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 5(5):482–492.
- TESFATSION, L. (2002). Agent-based computational economics : Growing economies from the bottom up. *Artificial Life*, 8:55–82.
- TESFATSION, L. (2006). Agent-based computational economics : A constructive approach to economic theory. *Handbook of computational economics*, 2:831–880.
- TESFATSION, L., PINGLE, M. *et al.* (2003). Evolution of worker-employer networks and behaviors under alternative non-employment benefits : An agent-based computational study. Rapport technique, Society for Computational Economics.
- THIBAUT, F., LORGNET, J.-P. et LEGENDRE, F. (2003). Que peut-on retenir de l'expérience française en matière de micro-simulation ? présentation générale. *Économie & prévision*, 160(4-5):1–15.
- THIRIOT, S., LEWKOWICZ, Z., CAILLOU, P. et KANT, J.-D. (2011). Referral hiring and labor markets : a computational study. In *Emergent Results of Artificial Economics*, pages 15–25. Springer.
- TITO, B. (2011). Institutional reforms and dualism in european labor markets. *Handbook of Labor Economics*, 4:1173–1236.
- TREUIL, J.-P., DROGOUL, A. et ZUCKER, J.-D. (2008). *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod.
- TVERSKY, A. et KAHNEMAN, D. (1974). Judgment under uncertainty : Heuristics and biases. *science*, 185(4157):1124–1131.
- Van den BERG, G. J. (1990). Nonstationarity in job search theory. *The review of economic studies*, 57(2):255–277.
- WIKIPÉDIA (2014). Cohorte (démographie) — wikipédia, l'encyclopédie libre. [En ligne ; Page disponible le 25-septembre-2015].
- WILLIAMSON, O. E. (1981). The economics of organization : The transaction cost approach. *American journal of sociology*, pages 548–577.
- ZERBO, A. (2006). Marché du travail urbain et pauvreté en Afrique subsaharienne : un modèle d'analyse. Rapport technique, Groupe d'Economie du Développement de l'Université Montesquieu Bordeaux IV.

Annexes

Annexe A : Le niveau des salaires, des charges et des allocations de référence

Les niveaux des salaires, des charges et des allocations de référence pour la France en 2011 qui sont implémentés dans WorkSim sont les suivants :

Le salaire minimum

Le montant mensuel net du Salaire minimum interprofessionnel de croissance (SMIC) par semaine est de 1072.07 euros en 2011, d'après (INSEE, 2013c)

Le RSA

Conditions d'éligibilité au RSA D'après (Service-Public.fr, 2011), les conditions d'éligibilité au RSA sont les suivantes :

- avoir 25 ans
- être parent isolé, c'est à dire être seul mais ne pas avoir d'enfants à charge
- avoir au moins 18 ans et pouvoir justifier d'avoir exercé une activité professionnelle pendant au moins 2 ans durant les 3 dernières années

Montant du RSA pour un foyer sans revenus d'activité En 2011, le montant du RSA socle en euros par mois est donné par le tableau suivant en fonction du nombre d'enfants :

Nombre d'enfants	Personne seule	Couple
0	492.9	739.35
1	739.35	887.22
2	887.22	1035.09
Par enfants en plus	197.16	197.16

TABLE 1 – Montant du RSA socle

Les enfants du foyer sont pris en compte dans le calcul s'ils sont âgés de moins de 25 ans et sont à la charge effective et permanente de l'individu (enfants qui ne perçoivent pas de rémunérations dans le modèle).

Montant du RSA pour un foyer avec revenus d'activité : RSA chapeau ou d'activité Si le foyer dispose de revenus d'activité, le RSA prend la forme d'un complément de ressources si les revenus d'activité sont inférieurs à un montant minimum garanti.

Le montant du RSA est égal à la différence entre ce montant minimum garanti et les revenus d'activité du foyer. On parle alors de RSA chapeau ou RSA d'activité.

Le montant minimum garanti dépend du montant des salaires perçus et de la composition du foyer.

Il est égal à la somme :

- de 62% des revenus d'activité du foyer,
- et du RSA socle correspondant à la composition de la famille

Les allocations chômage

Conditions d'affiliation à l'assurance chômage

Un individu au chômage a le droit à une allocation s'il satisfait aux conditions suivantes :

- il a été licencié
- il est à la fin d'un CDD
- il est à la recherche effective et permanente d'un emploi
- il justifie de 112 jours d'affiliation au régime d'assurance chômage dans les 28 mois qui précèdent la fin du contrat de travail pour les moins de 50 ans ou dans les 36 mois qui précèdent la fin du contrat de travail pour les 50 ans et plus.

	Pour les moins de 50 ans	Pour les 50 ans et +
Durée d'affiliation et période de référence	122 jours ou 610 heures au cours de 28 derniers mois	112 jours ou 610 heures au cours des 36 derniers mois
Durée d'indemnisation	Égale à la durée d'affiliation	Égale à la durée d'affiliation
Durée maximale d'indemnisation	730 jours (24 mois)	1095 jours (36 mois)

TABLE 2 – Conditions de durée d'indemnisation de l'allocation chômage

Calcul du montant brut de l'allocation

Le Salaire de référence Le montant de l'allocation de chômage correspond à un pourcentage du salaire journalier de référence (SJR).

Ce salaire journalier de référence s'obtient :

- par l'addition des salaires de référence de l'individu sur la période de référence, constituée des douze mois civils précédant le dernier jour travaillé et payé
- par la division de ce revenu de référence par 365 jours, desquels sont retranchés les jours d'absence et les jours sans contrat de travail.

Le Montant brut de l'allocation En 2011, le montant journalier brut de l'allocation est égal au montant le plus élevé entre :

montant1 = 40.4% du SJR + 11.64 €/jour

montant2 = 57.4% du SJR

Le montant minimal de l'allocation chômage est fixé à 28,38 €/jour. Et on vérifie aussi que ce montant ne dépasse pas 75% du SJR, le montant maximal de l'allocation de chômage.

Pour résumer, ce calcul de l'allocation de chômage journalier (UBEN) est donné par l'équation suivante :

$$UBEN = \min(\max(40.4\% SJR + 10.93; 57.4\% SJR; 26.66); 75\% SJR) \quad (1)$$

Si l'individu travaille à temps partiel, la partie fixe de l'allocation (11,64 €) et l'allocation minimale (28,38 €) sont affectées d'un coefficient de réduction :

coefficient de réduction temps partiel = horaire temps partiel / horaire légal ou conventionnel

Le Montant net de l'allocation Les bénéficiaires de l'allocation chômage sont assujettis aux charges sociales salariales.

Le prélèvement de ces charges ne doit pas avoir pour conséquence de réduire le montant de l'allocation versée à un montant inférieur à 48 €.

La pension de retraite

Au moment de ce départ en préretraite, on calcule une pension du retraité qui entrera en compte dans les calculs d'utilité de son ménage. On fait l'hypothèse qu'elle est la même pour tout les agents et égale à 75% du salaire des 25 dernières années dans le privé (en tenant compte des régimes complémentaires) et 75% du salaire des 6 derniers mois dans le public.

Les cotisations sociales

Les cotisations sociales sont des prélèvements associés au financement de prestations sociales. Elles sont assises sur les salaires. Une distinction est faite entre deux types de cotisations sociales :

- les cotisations sociales salariales calculées à partir du salaire net
- les cotisations sociales employeurs calculées à partir du salaire brut

D'après (INSEE, 2011e), la cotisation salariale est en France en 2011 de 22% par rapport au salaire brut en incluant l'ensemble des prélèvements de la sécurité sociale, de la contribution sociale généralisée (CSG) et de la contribution au remboursement de la dette sociale (CRDS).

Par rapport au salaire net cette cotisation est de 28%. Le salaire brut d'un salarié par rapport au salaire net est donc :

$$GS_{i,t}^{eff} = S_{i,t}^{eff} \times (1 + SalC) \quad (2)$$

avec $SalC = 0.28$.

D'après (INSEE, 2011e), les cotisations patronales par rapport au salaire brut sont de 42% donc le coût effectif d'un salarié est :

$$C_{i,t}^{eff} = GS_{i,t}^{eff} \times (1 + BenC) \quad (3)$$

avec $BenC = 0.42$. Si on exprime le coût effectif d'un salarié par rapport au salaire net, on a :

$$C_{i,t}^{eff} = S_{i,t}^{eff} \times (1 + BenC) \times (1 + SalC) \quad (4)$$

L'allègement de charges patronales sur les bas et moyens salaires, dispositif dit réduction "Fillon"

Les salaires versés inférieurs à 1,6 fois le SMIC ouvrent droit à un allègement des cotisations patronales dues au titre des assurances sociales (maladie, maternité, invalidité, vieillesse, décès) et des allocations familiales.

Le calcul de cet allègement de charges dépend de la taille de l'entreprise.

Entreprise de 20 salariés et plus L'employeur bénéficie d'un allègement des cotisations patronales égal, au maximum, à 26% du salaire brut. L'allègement devient nul à partir de 1,6 Smic calculé pour un an.

Pour ces entreprises, le coefficient mentionné ci-dessus est déterminé par application de la formule suivante :

$$Coefficient = \frac{CoefAlleg_{>20}}{0.6} \times (1.6 \times \frac{SMIC\ annuel}{rémunération\ annuelle\ brute} - 1) \quad (5)$$

Avec $CoefAlleg_{>20} = 0.26$

Entreprise de moins de 20 salariés Pour les gains et rémunérations versés par les employeurs occupant de 1 à 19 salariés au plus, le coefficient de réduction de charge se calcule de la même manière :

$$Coefficient = \frac{CoefAlleg_{<20}}{0.6} \times (1.6 \times \frac{SMIC\ annuel}{rémunération\ annuelle\ brute} - 1) \quad (6)$$

avec $CoefAlleg_{<20} = 0.281$

Équation du coût effectif d'un salarié avec l'allègement de charge En prenant en compte le coefficient d'allègement de charge, l'équation 7 devient :

$$C_{i,t}^{eff} = S_{i,t}^{eff} \times (1 + BenC) \times (1 + SalC) \times (1 - Coefficient) \quad (7)$$

Annexe B : Estimation des coefficients d'évolution de la demande de l'entreprise

Dans la section 2.5.2.4, à partir de l'historique de sa demande globale observée au cours de la dernière année (52 périodes), l'entreprise apprend des facteurs de tendance et d'aléa de l'évolution de sa demande μ_j, σ_j . Les deux facteurs sont déterminés à partir d'une régression linéaire sur son historique de demande :

$$D_{j,t} = a_j + \mu_j \times t + \epsilon_t \quad (8)$$

avec ϵ_t l'erreur aléatoire de moyenne 0 et d'écart type σ_j .

Si nous notons $(D_1^{histo}, D_2^{histo}, \dots, D_{52}^{histo})$ cet historique de demande, les paramètres a_j et μ_j peuvent être estimés en minimisant la somme des carrés des écarts entre les valeurs prédites par l'équation 8 et les valeurs observées :

$$\widehat{\mu}_j = \frac{\sum_{i=1}^{52} (i - 26.5)(D_i^{histo} - \overline{D^{histo}})}{\sum_{i=1}^{52} (i - 26.5)^2} \quad (9)$$

et

$$\widehat{a}_j = \frac{\sum_{i=1}^{52} (D_i^{histo}) - \widehat{\mu}_j \sum_{i=1}^{52} i}{52} \quad (10)$$

L'écart type σ_j est la racine carrée de la moyenne des écarts au carré entre les valeurs prédites par l'équation 8 et les valeurs observées :

$$\widehat{\sigma}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{52} (\widehat{a}_j + \widehat{\mu}_j \times i - D_i^{histo})^2}{52}} \quad (11)$$

Annexe C : Calcul du profit pour un contrat

Nous présentons ici l'algorithme utilisé par la firme pour évaluer la création (ou le renouvellement) d'un employé i sur un emploi p avec un contrat c de durée d_c et avec un ensemble de durée du contrat avant son terme D_c^{option} . Cet ensemble de durée représente l'ensemble des options possibles de fin de contrat. Par exemple avec un contrat de durée initiale d^{init} , mais renouvelable une fois avec la même durée, l'ensemble des durées possibles est $D_c^{option} = \{d^{init}, 2 \times d^{init}\}$, et durant le processus d'anticipation avec un scénario donné d'évolution de la demande la firme choisira la meilleure option de durée.

Cet algorithme unique est utilisé à différents endroits dans le modèle :

- pendant le processus de création d'emploi pour évaluer un profit potentiel avec un candidat sur un emploi avec un nouveau contrat (cf. section 2.6.1).
- pendant le processus d'évaluation d'un employé déjà dans l'entreprise : à la fin d'une période d'essai, et lors de l'évaluation d'un licenciement personnel et économique (cf. section 2.6.3)

- pendant le processus de recrutement pour calculer la norme d'embauche et évaluer les profits attendus des candidats à une offre d'emploi (cf. section 2.6.6)

Ce processus d'évaluation est conçu pour être générique. Il peut s'appliquer à des contrats en CDD et en CDI. Le détail de ces implémentations est présenté dans l'annexe D.

Pour évaluer le profit $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ avec un contrat c et un candidat potentiel i , l'entreprise prend en compte jusqu'à cinq phases :

1. Une phase éventuelle de recrutement pendant laquelle le poste restera vacant pendant une durée d_v , ce qui génère un coût total de vacance VC
2. Une phase éventuelle de formation de façon à transmettre au nouvel embauché des niveaux de capitaux humains au moins égaux à ceux requis par le poste. Cette formation a un coût noté F .
3. La phase du contrat proprement dite qui comprend éventuellement un renouvellement et qui dure de la période d_v à la période $d_v + d_c$.
4. Une phase éventuelle de préavis de durée d_n dans le cas d'un licenciement. Pendant cette période, nous supposons que l'employé ne produit pas, mais que l'entreprise continue de verser un salaire à l'employé, ce qui génère un coût supplémentaire c_n .
5. Une phase éventuelle de carence du poste de durée d_w dans le cas d'un contrat temporaire. Lors de cette phase le poste est "bloqué" et l'entreprise ne perçoit aucun profit.

(1) Phase de vacance du poste

Le poste reste vacant pendant une durée d_v . Cette durée est apprise en interne par l'entreprise pour chaque type de contrat (cf. section 2.5.2.3).

Pendant chaque période de vacance, l'entreprise doit payer un coût de vacance c_v du poste qui dépend du type de contrat et du salaire de base du poste (cf. section 2.3.3.6).

Le coût total de vacance actualisé du poste est :

$$VC = \sum_{d=1}^{d_v} \frac{c_v}{(1+r)^d} \quad (12)$$

Avec r le taux de préférence pour le présent de l'entreprise, paramètre exogène fixé¹.

(2) Phase de formation

Des coûts de formation TC doivent éventuellement être payés au moment de l'entrée du nouvel embauché s'il ne dispose pas des capitaux requis par le poste (après la période d_v de vacance du poste). Nous supposons dans le modèle que cette formation n'a pas de durée².

1. Avec un taux d'actualisation r , La valeur à t d'un revenu R qui sera obtenu d périodes plus tard est donc $\frac{R}{(1+r)^d}$

2. L'introduction d'une durée de formation pendant laquelle l'individu n'est pas sur le poste et donc ne produit pas pourrait être une extension du modèle. Cependant à ce stade nous avons choisi d'inclure implicitement ce coût lié au délai de formation dans le coût F total de formation payé au moment de l'entrée de l'individu sur le poste

Ces coûts actualisés après d_v périodes sont donnés par :

$$TC = \frac{TrC^{spec} + TrC^{gen} + TrC^{occup}}{(1+r)^{d_v}} \quad (13)$$

Avec TrC^{spec} le coût de formation spécifique, TrC^{gen} le coût de formation général et TrC^{occ} le coût de formation occupationnel.

Nous supposons que ces coûts sont proportionnels au salaire de base du poste et aux capitaux humains qu'il faut fournir au futur employé pour atteindre les capitaux requis du poste.

$$TrC^{spec} = PTr^{spec} \times S_{j,p,q}^{base} \times HC_{Req,p}^{spec} \quad (14)$$

$$TrC^{gen} = PTr^{gen} \times S_{j,p,q}^{base} \times \text{Max}(0, HC_{Req,p}^{gen} - HC_{i,t}^{gen}) \quad (15)$$

$$TrC^{occ} = PTr_q^{occup} \times S_{j,p,q}^{base} \times \text{Max}(0, HC_{Req,p,q}^{occ} - HC_{i,q,t}^{occ}) \quad (16)$$

Avec PTr^{spec} , PTr^{gen} et PTr_q^{occup} des paramètres exogènes calibrés dans l'intervalle $[0, 10]$.

(3) Phase du contrat proprement dite

Cette phase dure de la période d_v jusqu'à la période $d_v + d_c$. L'entreprise peut avoir la possibilité d'arrêter le contrat avant son terme. Cet ensemble des options possibles de fin de contrat est noté D_c^{option} .

Pendant cette période l'entreprise reçoit un profit $\Phi_{i,j,p,q,c}^*$ égal à la somme des profits cumulés pendant toute la durée du contrat (revenus - coûts salariaux).

Production et salaire hebdomadaire attendus du salarié i après d périodes de contrat : Une fois embauché, l'entreprise anticipe que le nouvel employé va cumuler de l'expérience sur le poste. C'est un élément en faveur d'un CDI par rapport à un CDD. En effet, avec un CDI, l'entreprise profite des gains de productivité acquis avec l'expérience par le candidat et peut donc amortir plus facilement les coûts de formation payés au moment de l'entrée de l'individu sur le poste.

D'après les équations 2.41, 2.30 la production attendue d'un employé potentiel sur le poste après d périodes passées sur le poste est :

$$Q_{i,j,p,q,t}^{est}(d) = \sigma_{i,p,q,t}^{Eval} \times Q_{j,p,q}^{base} \times kProd_i \times cond_{i,t} \times F_\beta(HC_{i,t}^{gen}(d), HC_{i,q,t}^{occ}(d)) \times F_\lambda(HC_{i,p,t}^{spec}(d)) \quad (17)$$

Avec $\sigma_{i,p,q,t}^{Eval} = \sigma_0$, car ici le niveau d'incertitude maximal sur la productivité du candidat qui intervient car le candidat potentiel n'a jamais été en poste dans l'entreprise (cf. section 2.5.2.2).

Le salaire effectif du candidat après d période est donné par l'équation 2.26 :

$$S_{i,j,p,q,t}(d) = \text{Max}(SMIC, S_{j,p,q}^{base} \times F_\beta(HC_{i,t}^{gen}(d), HC_{i,q,t}^{occ}(d)) \times F_\lambda^*(HC_{i,p,t}^{spec}(d)) \times G(U_{q,t})) \quad (18)$$

Une fois embauché, l'individu va recevoir une formation qui va *mettre à niveau* ses capitaux humains par rapport aux niveaux de capitaux humains requis sur le poste. Ces capitaux sont ensuite incrémentés de 1 à chaque période passée sur le poste (cf. section 2.3.1.2). Donc les capitaux humains estimés après d périodes passées sur le poste sont donnés par :

$$\begin{aligned} - & HC_{i,t}^{gen}(d) = \text{Max}(HC_{i,t}^{gen}, HC_{req,p}^{gen}) + d \\ - & HC_{i,q,t}^{occ}(d) = \text{Max}(HC_{i,q,t}^{occ}, HC_{req,q}^{occ}) + d \\ - & HC_{i,p,t}^{spec}(d) = HC_{req,p}^{spec} + d \end{aligned}$$

Calcul du profit hebdomadaire : A partir de cette production, du salarié et de la marge potentielle attendue (cf. section 2.5.2.4), l'entreprise en déduit le revenu hebdomadaire après d périodes passées sur le poste après d_v et pour un scénario θ d'évolution de sa demande :

$$\begin{aligned} \phi_{i,j,p,q,t}(\theta, d) = & P \times \text{max}(0, \text{min}(Q_{i,j,p,q,t}^{est}(d), AD_{j,q,t}(\theta, d + d_v))) \\ & - S_{i,j,p,q,t}(d) \times (1 + \text{BenC}) \times (1 + \text{SalC}) \end{aligned} \quad (19)$$

Profit cumulé et actualisé pour une durée d_c du contrat Le profit cumulé sur toute la période du contrat de d_v à d_c est donc :

$$\Phi_{i,j,p,q,c,t}(\theta, d_c) = \left(\sum_{d=1}^{d_c} \frac{\phi_{i,j,p,q,t}(\theta, d)}{(1+r)^{d+d_v}} \right) - \frac{\text{EndC}_c(d_c)}{(1+r)^{d_v+d_c}} \quad (20)$$

Avec $\text{EndC}_c(d_c)$, le coût de fin de contrat après la durée d_c . Ce coût de fin de contrat dépend du type de contrat CDD ou CDI. Il prend en compte un éventuel coût supplémentaire de préavis dans le cas d'un licenciement d'un contrat en CDI. Le délai de préavis est noté d_n (n pour *notice period*). Pendant cette période, nous supposons que l'employé ne produit pas, mais que l'entreprise continue de verser un salaire à l'employé, ce qui génère un coût supplémentaire fixe par période c_n .

Option sur la durée possible du contrat L'ensemble des durées possibles de fin du contrat pour un contrat c est D_c^{option} . Ces durées possibles sont minorées par un éventuel départ à la retraite anticipé de l'individu.

$$D_{c,i}^{option} = \{\text{min}(d, \text{age}_{retirement} - \text{age}_i), d \in D_c^{option}\} \quad (21)$$

La firme choisit la durée de fin du contrat $d^*(\theta) \in D_{c,i}^{option}$ qui donne le meilleur profit total dans le scénario θ d'évolution de la demande :

$$\Phi_{i,j,p,q,c,t}^*(\theta) = \max_{d_{option} \in D_{c,i}^{option}} \Phi_{i,j,p,q,c,t}(\theta, d_{option}) \quad (22)$$

La durée du contrat associée à cette meilleure option pour un scénario θ est noté $d^*(\theta)$.

(4) Phase de préavis

La quatrième phase à prendre en compte pour la création du contrat est la phase de préavis.

Dans le cas, où le contrat s'est terminé par un licenciement, l'entreprise doit tenir compte d'un délai de préavis noté d_n (Voir ci-dessus).

(5) Phase de carence

La cinquième et dernière phase à prendre en compte pour la création du contrat est une éventuelle phase de carence dans le cas d'un CDD.

Lorsqu'un CDD prend fin, l'employeur peut avoir à respecter un délai de carence noté d_w . Pendant ce délai, il ne peut embaucher de nouveau sur le même poste de travail une personne avec un autre contrat temporaire.

Calcul du profit total et du profit par période

Pour un scénario θ d'évolution de la demande, le profit total sur les 5 phases du contrat est :

$$\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta) = -VC - TC + \Phi_{i,j,p,q,c,t}^*(\theta) \quad (23)$$

On rappelle que $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^*(\theta)$ est le profit pendant la durée du contrat proprement dite pendant laquelle l'individu travaille sur le poste (cf. équation 22).

Pondération sur les trois scénarios Ce profit total est estimé pour trois scénarios d'évolution de la demande de l'entreprise :

- $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta = -1)$ dans le cas d'un scénario pessimiste
- $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta = 0)$ dans le cas d'un scénario neutre
- $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta = +1)$ dans le cas d'un scénario optimiste d'évolution de la demande

L'entreprise calcule ensuite un profit moyen pondéré sur ces trois scénarios :

$$\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot} = \omega_{-1} \times \Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta = -1) + \omega_0 \times \Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta = 0) + \omega_{+1} \times \Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta = +1) \quad (24)$$

Avec $\omega_{-1} + \omega_0 + \omega_{+1} = 1$. Ces poids ont une grande importance dans le modèle cognitif de l'entreprise, car ils représentent l'importance que l'entreprise donne à chaque type de scénario possible d'évolution de la demande dans son processus d'évaluation : scénario pessimiste, neutre ou bien optimiste. Ils représentent donc la façon dont l'entreprise prend en compte le risque dans le modèle.

La durée totale des cinq phases que dure le contrat pour un scénario θ est :

$$d_{tot}(\theta) = d_v + d^*(\theta) + d_w + d_n \quad (25)$$

La durée moyenne pondérée sur les trois scénarios est :

$$d_{tot} = \omega_{-1} \times d_{tot}(\theta = -1) + \omega_0 \times d_{tot}(\theta = 0) + \omega_{+1} \times d_{tot}(\theta = +1) \quad (26)$$

De façon à pouvoir comparer différents contrats sur un même poste qui ont des durées estimées différentes (lors de la création d'un nouveau poste notamment), nous ramenons le total profit $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}$ à un profit par période :

$$\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per} = \frac{\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}}{d_{tot}} \quad (27)$$

Synthèse de l'algorithme du calcul du profit par période $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$

Algorithm 6 Calcul du profit par période avec un individu i et un contrat c sur le poste

- 1: **pour chaque** scénario $\theta \in \{-1, 0, +1\}$ **faire**
 - 2: (1) calculer le coût de vacance actualisé du poste VC
 - 3: (2) calculer le coût de formation TC de l'individu
 - 4: (3) calculer le profit sur la durée du contrat :
 - 5: **pour chaque** durée possible du contrat $d_{option} \in D_{c,i}^{option}$ **faire**
 - 6: calculer le profit cumulé $\Phi_{i,j,p,q,c,t}(\theta, d_{option})$ sur la durée d_{option}
 - 7: **fin pour**
 - 8: Retenir le meilleur profit $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^*(\theta)$
 - 9: (4) Prendre en compte un délai de préavis d_n si un licenciement a eu lieu
 - 10: (5) calculer le délai de carence d_w dans le cas d'un contrat temporaire
 - 11: Calculer le profit total sur les 5 phases : $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}(\theta) = -VC - TC + \Phi_{i,j,p,q,c,t}^*(\theta)$
 - 12: Calculer la durée totale sur les cinq phases : $d_{tot}(\theta) = d_v + d^*(\theta) + d_w + d_n$
 - 13: **fin pour**
 - 14: Calculer le profit moyen $\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}$ et la durée moyenne d_{tot} pondérés sur les 3 scénarios $\theta \in \{-1, 0, +1\}$
 - 15: Calculer le profit par période $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per} = \frac{\Phi_{i,j,p,q,c,t}^{tot}}{d_{tot}}$
-

Annexe D : Implémentation des contrats CDD et CDI

Dans cette annexe, nous présentons la mise en oeuvre de l'algorithme présenté dans l'annexe C pour calculer le profit $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ avec un individu i sur un poste dans le cas d'un contrat en CDD et dans le cas d'un contrat en CDI.

Mise en oeuvre de l'algorithme de calcul du profit par période $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ pour un CDD

Durée totale et option de renouvellement d'un CDD

Un CDD est renouvelable une fois dans la limite de 18 mois. Pour simplifier, on fait l'hypothèse que le renouvellement est toujours de la même durée que la durée initiale du contrat, mais dans la limite de 18 mois. Un CDD de durée initiale d_{CDD} peut donc être vu comme un contrat de durée $d_c = \text{Min}(2 \times d_{CDD}, 18\text{mois})$, avec une option à d_{CDD} . De plus, il n'est a priori pas rationnel pour un employeur de se séparer d'un individu avant d_{CDD} ou entre la durée d_{CDD} et la durée de renouvellement $\text{Min}(2 \times d_{CDD}, 18\text{mois})$, car l'employeur devra verser au salarié l'ensemble des salaires qui étaient dus jusqu'à la fin prévue du contrat. Donc dans le cas d'un CDD, l'ensemble des options de durée retenu et qui intervient dans l'équation 22 est :

$$D_c^{option} = \{d_{CDD}, \text{Min}(2 \times d_{CDD}, 18\text{mois})\} \quad (28)$$

Durée du délai de carence

"Lorsqu'un contrat de travail à durée déterminée prend fin, il n'est pas possible d'embaucher, sur le même poste de travail, à nouveau en contrat à durée déterminée ou en contrat de travail temporaire, avant l'expiration d'une période égale : au tiers de la durée totale du contrat précédent, renouvellement inclus, si ce contrat est d'au moins 14 jours. Ainsi, un poste pourvu par un CDD de trois mois ne peut faire l'objet d'un nouveau CDD avant l'expiration d'un délai de carence d'un mois ; à la moitié de la durée totale du contrat précédent, renouvellement inclus, si ce contrat est inférieur à 14 jours. Un poste pourvu en CDD pendant 10 jours ne peut donc faire l'objet d'un nouveau CDD avant l'expiration d'un délai de 5 jours."

Donc le délai de carence qui intervient dans l'équation 25 est :

- $d_w = 1/3 \times d_c$ si $d_c \geq 2$. Dans le modèle la période est d'une semaine, on arrondi d_w à l'entier le plus proche.
- $d_w = 1/2 \times d_c$ si $d_c < 2$ semaines. Donc $d_w = 1$ si $d_c = 1$.

Coûts et durée de vacance

d_v et c_v qui interviennent dans l'équation 12 sont respectivement les durées et coûts de vacance d'un CDD appris en interne pour chaque type de contrat CDD de durée initiale d_{CDD} .

d_v est durée et coût de vacance d'un CDD de durée initiale d_{CDD} appris en interne par l'entreprise. C'est la durée moyenne des postes vacants en CDD de durée initiale d_{CDD} qui se sont terminés pendant les dernières années dans l'entreprise. Si l'entreprise n'a pas connu plus

de trois fins de poste vacant de ce type, la durée d_v est demandée à l'institut de statistiques qui apprend cette durée pour l'ensemble des entreprises.

Le coût par période d'un poste vacant en CDD est proportionnel au salaire de base d'un poste dans l'entreprise.

$$c_v = S_{j,p,q}^{base} \times PrCVac_{CDD} \quad (29)$$

avec $PrCVac_{CDD} \in [0, 10]$ un paramètre exogène calibré.

Dans le cas où l'entreprise envisage à t pour un poste p la création d'un CDD pour lequel le délai de carence effectif $WP_{p,t}$ n'est pas encore expiré, nous ajoutons à d_v ce délai $d_v \leftarrow d_v + WP_{p,t}$.

Pendant ce délai de carence, l'entreprise ne paie pas de coût de vacances car l'offre n'est pas encore publiée.

Coût de fin de contrat

Ce coût de fin de contrat $EndC_c(d_c)$ intervient dans l'équation 20.

Dans le cas d'un CDD, l'employeur doit verser une prime de précarité égale à 10% des salaires bruts versés pendant toute la durée du contrat, donc :

$$EndC_c(d_c) = 10\% \times \sum_{d=0}^{d_c} S_{j,p,q,c,t}(d) \times (1 + SalC) \quad (30)$$

Cas particulier du CDD d'usage

D'après (ACOSS, 2011), ce contrat permet d'embaucher de manière répétée des salariés en CDD avec reconduction du contrat sans limitation. Il n'y a pas de date de fin précise dans le contrat, ni besoin de respecter de délai de carence, ni d'indemnité de fin de contrat à régler par l'employeur. Pour ce CDD d'usage, on a donc $d_{CDD} = 1$, $d_w = 0$ et $EndC_c(d_c) = 0$.

Mise en oeuvre de l'algorithme de calcul du profit par période $\phi_{i,j,p,q,c,t}^{per}$ pour un CDI

Durée du CDI

Un CDI n'a pas de durée prédéfinie, sa durée maximale théorique est l'âge de départ à la retraite du salarié. Cependant, en pratique, le salarié peut quitter le poste de lui même, l'entreprise peut constater une insuffisance professionnelle du salarié et mettre fin à sa période d'essai, etc... Donc l'entreprise doit estimer une durée potentielle moyenne d'un CDI par apprentissage.

Cette durée espérée moyenne d_{CDI} est apprise en interne. C'est la durée moyenne contrats en CDI qui se sont terminés pendant les trois dernières années dans l'entreprise. Si l'entreprise n'a pas connu plus de trois fins de contrat en CDI, cette durée est demandée à l'institut de statistiques qui apprend la durée pour l'ensemble des entreprises.

L'entreprise n'a pas d'option de licenciement car elle ne sait pas à l'avance si elle va avoir le moyen de justifier son licenciement. Donc le contrat est évalué avec cette durée unique d_{CDI} .

Donc dans le cas d'un CDI, l'entreprise n'a pas d'option de licenciement avant d_{CDI} donc $D_c^{option} = \{d_{CDI}\}$.

Coûts et durée de vacance

d_v est durée et coût de vacance d'un CDI appris en interne par l'entreprise. C'est la durée moyenne des postes vacants en CDI qui se sont terminés pendant les trois dernières années dans l'entreprise. Si l'entreprise n'a pas connu plus de trois fins de poste vacant, la durée d_v est demandée à l'institut de statistiques qui apprend cette durée pour l'ensemble des entreprises.

Le coût par période d'un poste vacant en CDI est proportionnel au salaire de base d'un poste dans l'entreprise.

$$c_v = S_{j,p,q}^{base} \times PrCVac_{CDI} \quad (31)$$

avec $PrCVac_{CDI} \in [0, 10]$ un paramètre exogène calibré.

Durée du délai de carence

Il n'y a pas de délai de carence pour un CDI, donc $d_w = 0$.

Coût fin de contrat pour un CDI

Les coûts de fin de contrat du CDI, $EndC_c(d_{CDI})$ anticipé par l'entreprise sont composés de différents éléments :

- un coût éventuel de licenciement personnel PFC si l'individu se révèle être en dessous des compétences requises pour le poste.
- un coût éventuel de licenciement économique $EFC(d_{CDI})$

$$EndC_c(d_{CDI}) = PFC + EFC(d_{CDI}) \quad (32)$$

Détermination d'un coût éventuel de licenciement personnel Lorsque l'entreprise évalue un individu en contrat CDI, elle prend en compte que l'individu peut se révéler à l'avenir peu productif et que l'entreprise devra le licencier. Ce cas de licenciement pour motif personnel dépend des caractéristiques propres du salarié et ne peut pas être évalué avec précision car l'entreprise ne connaît pas le véritable noyau de productivité de l'individu.

Nous supposons que le coût moyen lié à un éventuel licenciement personnel est appris par l'ensemble des entreprises.

L'institut de statistiques comptabilise les contrats en CDI qui se sont terminés depuis la dernière année et calcule pour chaque niveau de qualification, la probabilité qu'un contrat en CDI se termine par un licenciement personnel $PrPF_q$ et le coût moyen associé dans ce cas : PFC_q^{avg} .

Le coût moyen anticipé par l'entreprise d'un licenciement personnel est donc :

$$EFC = PrPF_q \times PFC_q^{avg} \quad (33)$$

Détermination d'un coût éventuel de licenciement économique Nous supposons que ce coût de licenciement économique doit être pris en compte pour un scénario θ d'évolution de la demande et dans le cas où le profit $\phi_{i,j,p,q,t}(\theta, d_{CDI})$, calculé à la fin de la durée prévue du contrat d_{CDI} , est négatif, l'entreprise doit prendre en compte que l'individu devra potentiellement être licencié.

Nous notons ce coût $EFC(d_{CDI})$ ce coût de licenciement après la durée d_{CDI} de contrat. Cette durée est comptée à partir du moment où l'entreprise réalise son évaluation.

Si l'individu est déjà en poste, la durée effective de l'individu depuis le début de son contrat est $d_{CDI} + Sen_{i,t}$, avec $Sen_{i,t}$ l'ancienneté de l'individu déjà acquise sur le poste au moment de l'évaluation par l'entreprise de l'individu au temps t .

Ce coût de licenciement économique comprend quatre éléments :

1. une indemnité légale de licenciement spécifique à un licenciement économique : $LegInd(d_{CDI})$
2. des frais supplémentaires si l'employé effectue un recours devant les prud'hommes $ApC(d_{CDI})$
3. un coût de préavis : $NC(d_{Lic})$
4. un coût éventuel de Plan de Sauvegarde de l'Emploi (PSE) dans le cas d'une grande entreprise $PseC(d_{CDI})$

$$EFC(d_{CDI}) = LegInd(d_{CDI}) + ApC(d_{CDI}) + NC(d_{CDI}) + PseC(d_{CDI}) \quad (34)$$

Calcul de l'indemnité de licenciement $LegInd(d_{CDI})$ après la durée d_{CDI} du contrat D'après l'article R. 1234-2 du Code du travail, dans sa rédaction issue du décret 2008-715 du 18 juillet 2008, l'indemnité de licenciement est d'un cinquième de mois de salaire par année d'ancienneté. A partir de dix ans d'ancienneté, cette indemnité minimum est d'un cinquième de mois de salaire de référence plus deux quinzièmes de mois par année d'ancienneté au-delà de dix ans (d'après le code du travail, L.1234 – 9, R.1234 – 2 et R.1234 – 4). Le salaire de référence $S_{ref}(d_{Lic})$ après d_{Lic} période retenue pour le calcul de ces indemnités est le maximum entre la moyenne des salaires bruts des 12 derniers mois et la moyenne des salaires bruts des 3 derniers mois.

Donc :

$$S_{ref}(d_{CDI}) = \max \left(\sum_{d=d_{CDI}-52}^{d_{CDI}} S_{j,p,q,c,t}(d), \sum_{d=d_{CDI}-12}^{d_{CDI}} S_{j,p,q,c}(d) \right) \times (1 + SalC) \quad (35)$$

Nous utilisons ici l'équation 18 pour déterminer le salaire $S_{j,p,q,c,t}(d)$ après d périodes. Pour le calcul de l'indemnité de licenciement il faut par contre prendre en compte le total du

temps passé par l'individu depuis son entrée sur le poste : $d_{CDI} + Sen_{i,t}$. Bien sûr dans le cas de l'évaluation d'une nouvelle embauche, l'individu n'est pas sur le poste donc $Sen_{i,t} = 0$.

L'indemnité légale de licenciement après cette durée d_{CDI} est :

$$LegInd(d_{CDI}) = \frac{1}{5} \times S_{ref}(d_{CDI}) \times floor\left(\frac{d_{CDI} + Sen_{i,t}}{52}\right) \\ \left(+ \frac{2}{15} \times S_{ref}(d_{CDI}) \times floor\left(\frac{d_{CDI} + Sen_{i,t}}{52}\right) \text{ si } floor\left(\frac{d_{CDI} + Sen_{i,t}}{52}\right) \geq 10 \right) \quad (36)$$

Prise en compte du coût supplémentaire si l'individu effectue un recours devant les prud'hommes
 $ApC(d_{CDI})$ A cette indemnité de licenciement peut s'ajouter des frais supplémentaires si l'employé effectue un recours devant les prud'hommes. La probabilité que l'individu fasse recours aux Prud'hommes dans le cas d'un licenciement économique est noté $PrApE$. Elle est notée $PrApP$ dans le cas d'un licenciement personnel. La probabilité que le salarié obtienne gain de cause à l'issue de cette procédure est notée $PrSE$. Dans le cas où le salarié effectue un recours et gagne la procédure, l'employeur doit verser une indemnité supplémentaire qui ne peut être inférieure aux salaires des 6 derniers mois. (1234-9). De plus, d'après les articles L.1235-3 et L.2335-11, l'employeur fautif doit rembourser aux organismes publics, les indemnité de chômage que le salarié a perçues depuis le jour de son licenciement dans la limite de 6 mois d'indemnité de chômage. Pour simplifier nos calculs dans notre modèle, nous retiendrons que les coûts globaux supplémentaires à prendre en charge par l'employeur en cas de perte de la procédure aux prud'hommes représentent environ 1 an de salaire de l'employé.

Dans le cas d'un licenciement économique, le coût moyen à prendre en compte est :

$$ApC(d_{CDI}) = 52 \times S_{ref}(d_{CDI}) \times PrApE \times PrSE \quad (37)$$

Dans le cas d'un licenciement personnel, le coût moyen à prendre en compte est :

$$ApC(d_{CDI}) = 52 \times S_{ref}(d_{CDI}) \times PrApP \times PrSE \quad (38)$$

Coût supplémentaire de préavis $NC(d_{CDI})$ En cas de licenciement, l'entreprise doit prendre en compte une durée de préavis d_n pour le licenciement d'un CDI (article L1234-1 du code du travail). Ce préavis est d'un mois dans le cas où l'ancienneté du salarié est inférieure à 2 ans et de 2 mois sinon. Donc $d_n = 4$ si $d_{CDI} + Sen_{i,t} < 2 \times 52$, $d_n = 8$ sinon .

Pendant cette durée, l'entreprise continue de verser un salaire correspondant au moment du licenciement et l'employé ne produit plus. Le poste est "bloqué" pendant cette période.

Le coût du préavis est le total des salaires versés pendant cette période. et nous supposons que le salaire payé chaque période correspond au dernier salaire versé au moment du licenciement car l'individu ne sera plus augmenté. Donc :

$$NC(d_{CDI}) = d_n \times S(d_{CDI}) \times (1 + BenC)(1 + SalC) \quad (39)$$

Prise en compte d'un coût supplémentaire de plan social Dans le cas où l'entreprise est une entreprise de plus de 50 salariés, elle doit envisager un coût supplémentaire de plan social, égal à dix fois le salaire mensuel brut :

$$PseC(d_{CDI}) = 10 \times 4 \times S(d_{CDI}) \times (1 + SalC) \quad (40)$$

Annexe E : Module démographique

Nous souhaitons donc conserver un ensemble de caractéristiques démographiques de la France en 2011 :

- la répartition des individus par mode de cohabitation et par âge suivant la répartition de 2011 (INSEE, 2011g).
- la proportion d'individus retraités par âge suivant les données de (INSEE, 2011f)
- le nombre total d'individus en âge de travailler de 15 à 65 ans en 2011
- la proportion d'individus étudiants par âge en 2011 (INSEE, 2011m).

Nous choisissons de conserver des caractéristiques démographiques importantes de l'année 2011, à mesure que les agents vieillissent dans le modèle, sans pour autant viser à reproduire les flux démographiques réels.

Évolution des ménages

Évolutions des états des individus dans les ménages

Dans WorkSim, nous avons trois états possible dans les ménages pour les agents individus de la simulation : *enfant dans un ménage*, *adulte célibataire* (avec ou sans enfants) et *adulte d'un couple* (avec ou sans enfants).

Nous conservons fixe dans la simulation les proportions d'individus en France en 2011 ((INSEE, 2011g)) dans chaque état matrimonial pour chaque tranche d'âge de 5 ans noté T : 15-20 ans, 20-25 ans, etc...

Tous les 3 mois dans le modèle, nous calculons le nombre d'individus dans chaque état matrimonial et par tranche d'âge T et nous procédons aux changements d'état des individus par tranche d'âge de la façon suivante de façon à maintenir fixe les proportions d'individus dans chaque état matrimonial pour chaque tranche d'âge. Le processus d'évolution des ménage se déroule de la façon suivante pour chaque tranche d'âge :

1. Si la proportion d'individus dans l'état *enfants dans un ménage* de la tranche d'âge T est supérieure à la proportion requise de la tranche d'âge, nous choisissons aléatoirement un nombre d'individus du statut *enfants dans un ménage* qui passent dans l'état *adulte célibataire*.
2. Une proportion $RtSep$ des couples se sépare. Ces agents passent de l'état *adulte d'un couple* à l'état *adulte célibataire*.

3. Si la proportion d'individus dans l'état matrimonial *adulte célibataire* de la tranche d'âge est supérieure à la proportion requise, nous choisissons aléatoirement un nombre d'individus du statut *adulte célibataire* avec à chaque fois un homme et une femme du même niveau de qualification (homogamie) et de la même tranche d'âge qui passent dans l'état *adulte d'un couple*.

Cette méthode permet de conserver de façon certaine, les stocks d'individus dans chaque état de l'année de référence que nous modélisons, lorsque les agents vieillissent. A noter que les flux entre les états ne sont pas les flux réels de transition de l'année de référence qui auraient tendance à déformer la répartition des individus entre les états au cours de la simulation.

Nous faisons l'hypothèse simplificatrice que les couples sont toujours composés d'un homme et d'une femme, toujours du même niveau de qualification et de la même tranche d'âge.

Créations et destructions de ménages

Le modèle évolue en population fermée donc les agents s'unissent entre eux pour constituer des ménages. les enfants de plus de 15 ans qui ont le statut « enfant d'un couple » font partie d'un ménage, lorsque ces mêmes enfants quittent leurs parents, ils constituent un nouveau ménage, etc... Dans ce modèle en population fermée, les revenus d'un membre du ménage sont intégrés dans le calcul de l'utilité des autres membres du ménage, donc influent leurs décisions.

En fonction de l'évolution des états matrimoniaux des agents "individus" déterminés dans la section précédente, nous faisons évoluer les ménages du modèle :

- Lorsqu'un individu passe de l'état *enfants dans un ménage* à l'état *adulte célibataire* il sort du ménage de ses parents et en crée un nouveau.
- Lorsqu'un couple se sépare, l'ancien ménage est détruit et deux nouveaux ménages sont créés. Pour simplifier nous supposons que la femme du ménage reçoit automatiquement la garde des enfants s'il y avait des enfants dans le ménage.
- Les individus dans l'état *adulte célibataire* qui passent dans l'état *adulte d'un couple* forment des nouveaux ménages avec un homme et une femme. Si la femme avait des enfants à charge ils sont transférés dans le nouveau ménage du couple.

Naissances dans les ménages

Nous calculons le nombre d'enfants total dans les ménages. Si ce nombre d'enfants est inférieur au nombre total d'enfant cible de l'année 2011 ((INSEE, 2011g)), nous ajoutons de façon aléatoire des enfants "non-instanciés" en tant qu'agents dans les ménages des femmes de moins de 40 ans qui sont dans l'état *adulte d'un couple*.

Départs en retraite et préretraite

Nous supposons qu'à 65 ans les agents partent automatiquement à la retraite. De plus, les agents âgés de 50 à 65 ans peuvent partir en préretraite. Nous reproduisons la part d'individus retraités par âge suivant les données de (INSEE, 2011f).

Pour chaque tranche d'âge de 5 ans, si la proportion d'individus dans l'état *retraité* est inférieure à la proportion de retraités requise de la tranche d'âge, nous choisissons aléatoirement un nombre d'individus dans l'état *employé* qui passent dans l'état *retraité*.

Au moment de ce départ en préretraite, le poste qu'il occupait devient vacant et on calcule une pension du retraité qui entrera en compte dans les calculs d'utilité des autres agents qui composent son ménage. L'individu reste cependant dans le ménage jusqu'à son décès et sa sortie effective de la simulation et ne prend plus de décisions dans le modèle.

Par ailleurs, si l'individu qui part à la retraite occupait un poste de fonctionnaire, nous incrémentons le nombre de places libres de fonctionnaire *nbF* de 1.

Entrées sur le marché du travail

En fonction du nombre d'individus partis à la retraite à l'âge de 65 ans à cette période de la simulation, nous faisons entrer le même nombre d'agents à l'âge de 15 ans de façon à conserver le même nombre d'agents dans la tranche d'âge 15-64 ans. Les nouveaux entrants sont dans l'état d'étudiant et reçoivent un niveau de qualification cadre, profession intermédiaire, employé/ouvrier, selon la distribution de probabilité qui correspond à la répartition par catégorie socioprofessionnelle sur la tranche d'âge 15-25 ans en 2011 (INSEE, 2011).

L'agent entre dans le modèle dans l'état "enfant dans un ménage". Cet agent enfant va "instancier" un enfant non instancié d'un couple ou d'une famille monoparentale. On tire pour cela au hasard un couple du modèle qui a un enfant "non-instancié".

Sortie des études

Nous reproduisons la part d'étudiants par âge en 2011 suivant (INSEE, 2011m). Pour chaque tranche d'âge d'un an, si la proportion d'individus dans l'état *étudiant* est supérieure à la proportion de retraités requise de la tranche d'âge, nous choisissons aléatoirement un nombre d'individus dans l'état *étudiant* qui entrent sur le marché du travail. Si le nombre de place libre de fonctionnaire *nbF* est supérieur à 1, alors l'étudiant reçoit un poste de fonctionnaire (cf. section 2.4.4) et il passe dans l'état de *fonctionnaire* et le nombre de place libre *nbF* est décrémenté de 1. Si *nbF* = 0, l'individu passe dans l'état *chômeur*. Ce mécanisme de remplacement des fonctionnaires permet de garantir un nombre de fonctionnaires constant dans la simulation pour l'année 2011.

Décès des agents et sortie de la simulation

Les individus sortent définitivement de leur ménage et disparaissent de la simulation lorsqu'ils décèdent à l'âge de 73.55 ans pour les hommes et 81.1 ans pour les femmes, ce qui correspond à l'âge moyen des décès par sexe en 2011 (INSEE, 2011b).

Annexe F : Les paramètres fixés du modèle

Paramètre	Description	Valeur	Equation	Source
DSJ	Temps requis pour rechercher et étudier une offre d'emploi	8 heures	eq. 2.61	<i>a priori</i>
Ta	Temps libre par semaine	91 heures	eq. 2.37	(INSEE, 2011c)
Ru_4	Sensibilité de l'utilité de réservation à la modification de l'utilité du chômage	0.5	eq. 2.62	<i>a priori</i>
σ_q	Écart type de la distribution de productivité de base des firmes	0.1	eq. 2.5	<i>a priori</i>
σ_Ψ	Écart type de la distribution des parts de demande allouées à chaque niveau de qualification	0.1	eq. 2.9	<i>a priori</i>
σ_{alpha}	Écart type de la distribution de la préférence de base pour le temps libre des individus	0.1	eq. 2.3.1.1	<i>a priori</i>
λ	Sensibilité au capital humain spécifique	0.00038	eq. 2.23	<i>a priori</i>
λ'	Facteur de décroissance de la sensibilité au capital humain spécifique	5×10^{-8}	eq. 2.23	<i>a priori</i>
σ_A	Ratio du salaire de base que représente l'aménité	0.5	eq. 2.7	<i>a priori</i>
$PrSt$	Ratio du salaire de base que représente le facteur de stabilité	0.5	eq. 2.35	<i>a priori</i>
$minC$	Facteur de forme minimal d'un individu	0.5	eq. 2.4	<i>a priori</i>
$maxC$	Facteur de forme maximal d'un individu	1.5	eq. 2.4	<i>a priori</i>
NPU	Nombre de chercheurs d'emploi connus chaque mois par une firme	3	eq. 2.48	<i>a priori</i>
NPJ	Nombre d'emplois pourvus connus chaque mois par un individu	3	eq. 2.57	<i>a priori</i>
$NSJU$	Nombre moyen d'offres d'emploi prospectées chaque semaine par un chômeur	4	eq. 2.73	<i>a priori</i>
$NSJO$	Nombre moyen d'offres d'emploi prospectées chaque semaine par un PARAE	2	eq. 2.74	<i>a priori</i>

Paramètre	Description	Valeur	Équation	Source
r	Taux d'actualisation dans l'économie par an	3%	eq. 2.4	<i>a priori</i>
ω	Sensibilité du salaire au taux de chômage par niveau de qualification	-0.1	eq. 2.25	(Nijkamp et Poot, 2005)
PD	Temps maximal avant la suppression d'un poste <i>en attente</i>	3 mois	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,1w}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD d'1 semaine	3 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,1m}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD d'1 mois	6 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,2m}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD de 2 mois	8 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,3m}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD de 3 mois	10 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,6m}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD de 6 mois	13 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,12m}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD de 12 mois	17 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
$VD_{CDD,18m}$	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec un CDD de 18 mois	20 semaines	section 2.6.2	<i>a priori</i>
VD_{CDI}	Temps maximal avant la suppression d'un poste vacant avec CDI	6 mois	eq. 2.6.2	section 2.6.2
$PrApP$	Probabilité d'un recours aux Prud'hommes dans le cas d'un licenciement personnel	0,17	eq. 38	(Serverin et Valentin, 2009)
$PrApE$	Probabilité d'un recours aux Prud'hommes dans le cas d'un licenciement économique	0,0112	eq. 37	(Serverin et Valentin, 2009)
$PrSE$	Probabilité d'un succès aux Prud'hommes en cas de recours	0,645	eq. 37	(Munoz Perez et Serverin, 2005)
Psm	Probabilité d'une faute grave chaque semaine	0.00001	section 2.6.3	<i>a priori</i>

Annexe G : Choix de l'algorithme de calibration

Nous avons comparés différents algorithmes de calibration sur un modèle jouet de type proie-prédateur (Lotka, 1925). Nous reprenons un modèle développé par (Sabelli et Kovacevic, 2008) en JAVA sur la plateforme multi-agent Repast et disponible en ligne³

Ce modèle simule la dynamique d'un écosystème avec deux types d'agents en interaction, des prédateurs et des proies, qui se déplacent sur une grille en deux dimensions. Les prédateurs consomment des proies pour survivre, les proies consomment de l'herbe, et l'herbe repousse de façon aléatoire dans l'environnement. Il y a des mâles et des femelles dans chaque espèce qui peuvent se reproduire et donner naissance à un nouvel agent du même type.

Les paramètres fixés Nous fixons un certain nombre de paramètres du modèle. Ils sont supposés connus pour l'écosystème que l'on étudie :

Paramètre	Description	Valeur
worldXSize	Largeur de la grille	51
worldYSize	Hauteur de la grille	54
newGrassGrothRate	Probabilité que de l'herbe repousse chaque période sur une case	0.12
numPredatorAgents	Nombre initial de prédateurs	100
numPreyAgents	Nombre initial de proies	1000
agentMinLifespan	Durée de vie minimale d'un agent	100
agentMaxLifespan	Durée de vie maximale d'un agent	100
preyAgentMinAgetoEat	Age minimum pour qu'une proie puisse être mangée	5
maximumEnergyPredator	Niveau maximum d'énergie qu'un prédateur peut conserver	100
maximumEnergyPrey	Niveau maximum d'énergie qu'une proie peut conserver	50

TABLE 3 – Les paramètres fixés

Les paramètres à calibrer Il y a 8 paramètres que nous supposons inconnus pour ce modèle. Pour chacun de ces paramètres nous fixons une plage de valeurs admissibles. Ceci permet de définir un espace de paramètres que notre algorithme de calibration va parcourir pour chercher une solution.

Les cibles de la calibration Nous supposons que les objectifs de la calibration sont d'obtenir les valeurs suivantes après 50 périodes de simulation :

Mise en œuvre de différents algorithmes pour calibrer ce modèle Nous évaluons différents algorithmes sur ce modèle jouet :

3. <http://www.inverudio.com/programs/PredatorPrey/pp.php>

Paramètre	Description	Valeur
energyPredatorUseEachTick	Énergie utilisée par les agents prédateurs à chaque période	[0,5]
energyPredatorUseForMate	Énergie utilisée par les prédateurs pour s'accoupler	[0,10]
energyTakenFromPrey	Énergie gagnée par un prédateur quand il mange une proie	[0,100]
probabilityForPredatorMate	Probabilité pour un prédateur de s'accoupler	[0,1]
energyPreyUseEachTick	Énergie utilisée par la proie chaque période	[0,5]
energyPreyUseForMate	Énergie utilisée par la proie pour s'accoupler	[0,10]
energyTakenFromGrass	Énergie gagnée par la proie quand elle mange de l'herbe	[0,50]
probabilityForPreyMate	Probabilité pour une proie de s'accoupler	[0,0.5]

TABLE 4 – Les paramètres à calibrer

Paramètre	Description	Cible
RatioPreyPredator	Nombre de proies divisé par le nombre de prédateurs	10
AvgRatePreyEaten	Nombre de proies mangées pendant les 12 dernières périodes divisé par le nombre moyen de proies pendant cette période	0.022
AvgRatePreyBirth	Nombre de naissances de nouvelles proies pendant les 12 dernières périodes sur le nombre moyen de proies pendant cette période	0.0496

TABLE 5 – Les cibles de la calibration

- Un algorithme de recuit simulé (SA) avec les méta-paramètres classique de 1% pour le taux de refroidissement et de 100 pour la température initiale.
- Un algorithme génétique (GA) : Nous utilisons l'algorithme standard proposé par (Holland, 1975) avec les mêmes paramètres que dans ceux utilisés pour calibrer un modèle multi-agent de nuée d'oiseaux (Stonedahl et Wilensky, 2011) : une taille de population de 30, un taux de croisement de 0.7 et un taux de mutation de 0.05, avec une sélection par tournoi.
- Un algorithme *Particle Swarm Optimization* (PSO) (Kennedy, 2010)
- Un algorithme *Covariance Matrix Adaptation - Evolution Strategy* (CMA-ES) (Hansen et Ostermeier, 2001) avec un pas initiale de la distribution de σ_{Init} égal à 0.2.
- un algorithme multi-objectif NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) (Deb *et al.*, 2002) avec les mêmes paramètres que ceux utilisés dans (Narzisi *et al.*, 2006) pour calibrer un modèle multi-agent : un taux de croisement binaire simulé (SBX) et une mutation polynomiale, avec des probabilités et des indices de distribution respectivement de $p_c = 0.9$, $v_c = 10$ et de $pm = \frac{1}{8}$, $v_m = 20$.

Protocole d'évaluation Nous lançons 100 calibrations avec chaque algorithme. Pour chacune de ces calibrations, nous initialisons aléatoirement le premier ensemble de paramètres testés dans l'espace de paramètre. Nous utilisons une fonction de fitness fit égale à la somme des écarts relatifs au carré des trois objectifs. Pour évaluer un jeu de paramètres nous lançons 100 répliquions de la simulation en parallèle pour gommer les effets stochastiques. Nous mesurons le nombre moyen d'itérations requis pour calibrer le modèle, $fit < \epsilon$, avec deux niveaux de précisions requis $\epsilon = 0.01$ et $\epsilon = 0.001$ pour la fonction de $fitness$.

Algorithm	Nombre moyen de simulations	
	$\epsilon = 0.01$	$\epsilon = 0.001$
SA	243 796	524 142
NSGAI	135 807	425 736
GA	96 016	314 678
PSO	10 479	33 465
CMA-ES	4 277	12 689

Pour les algorithmes les plus rapides, PSO, GA et CMA-ES, nous calculons aussi la $fitness$ moyenne obtenues avec les algorithmes en fonction du nombre de simulations nécessaires pour l'obtenir. Nous ajoutons des barres d'erreurs correspondant à l'intervalle de confiance à 95%.

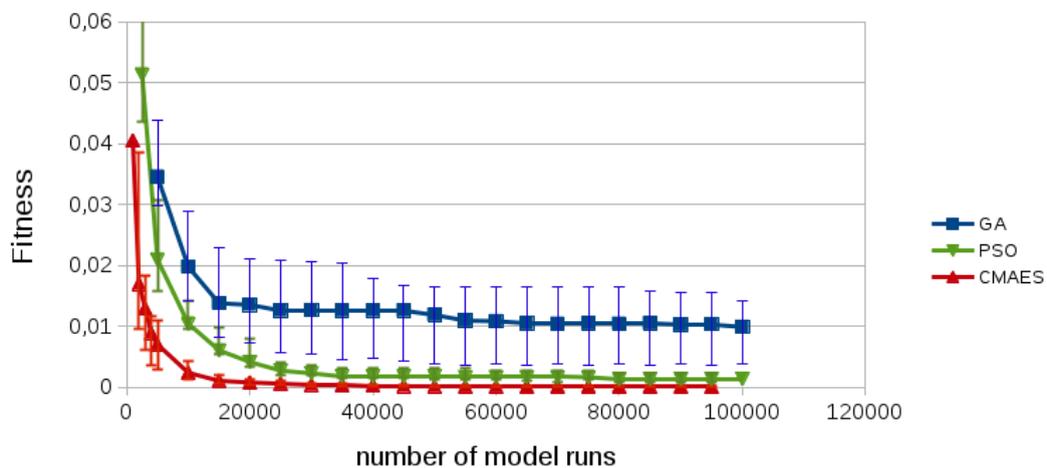


FIGURE 1 – Comparaison d'algorithmes évolutionnaires

L'algorithme CMA-ES demande le moins de simulations pour trouver une solution avec une fonction de $fitness$ acceptable. Nous choisissons de l'utiliser pour calibrer le modèle WorkSim.

Annexe H : Diagrammes de flux par niveau de qualification

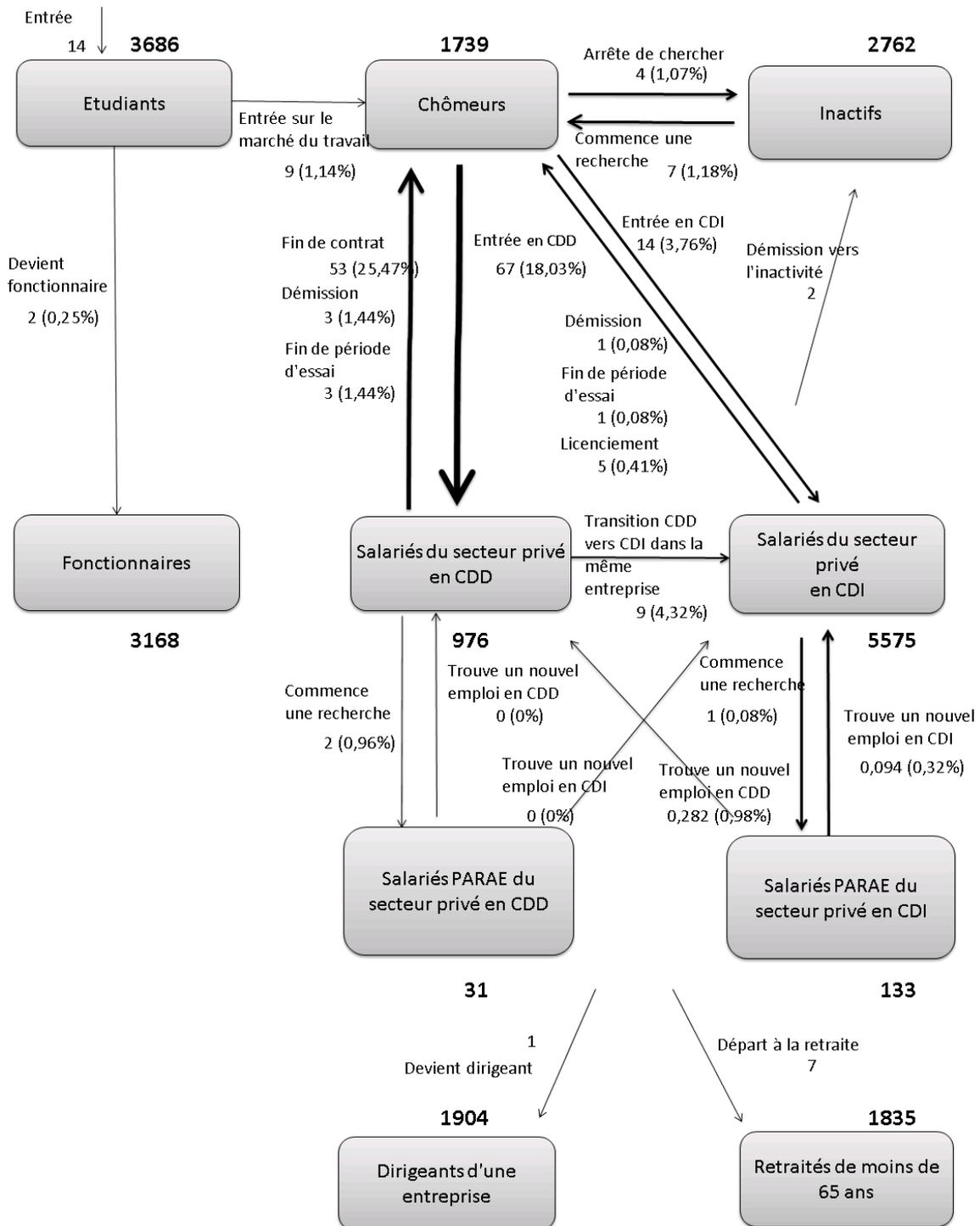


FIGURE 2 – Diagramme de flux Employés/Ouvriers

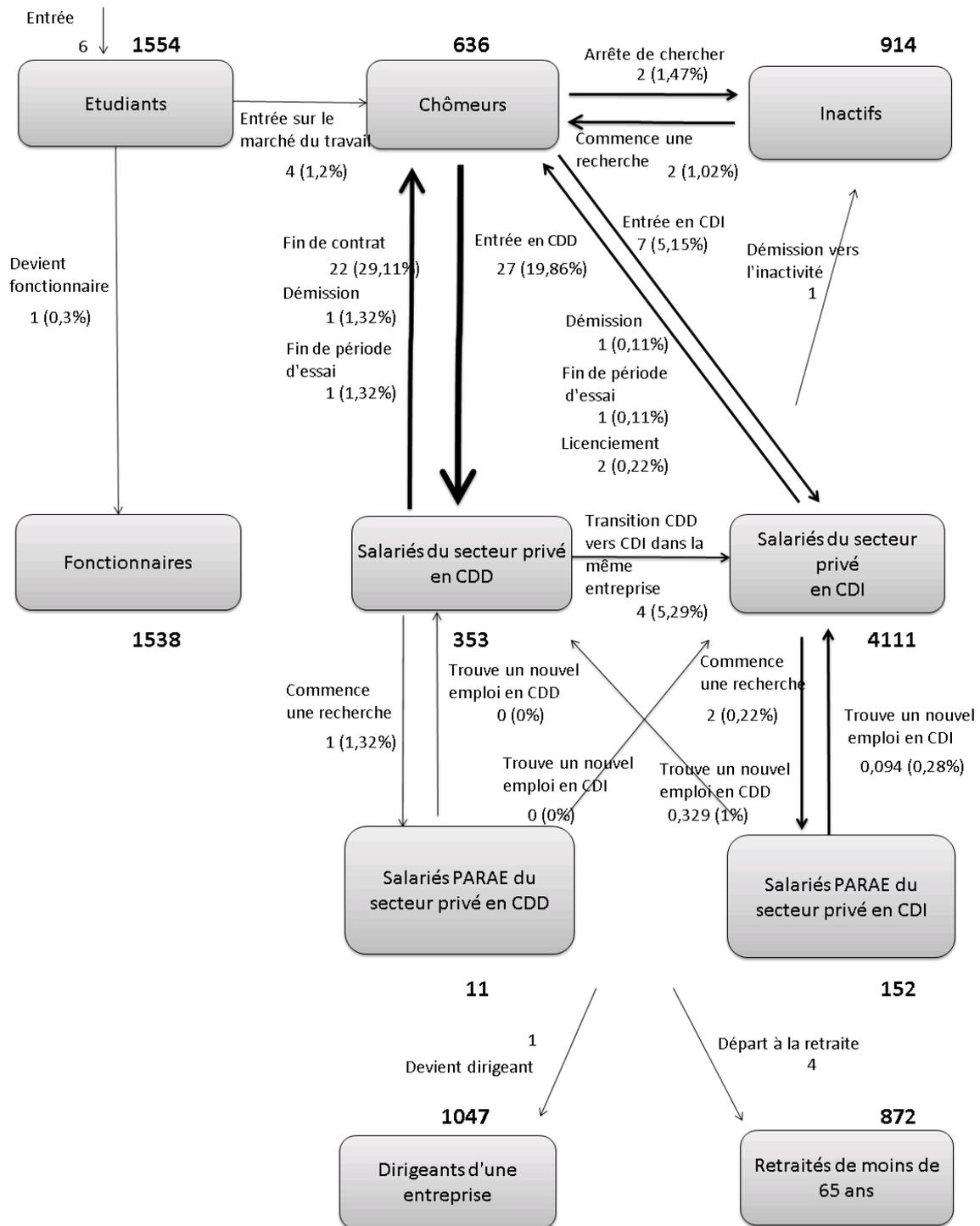


FIGURE 3 – Diagramme de flux Professions intermédiaires

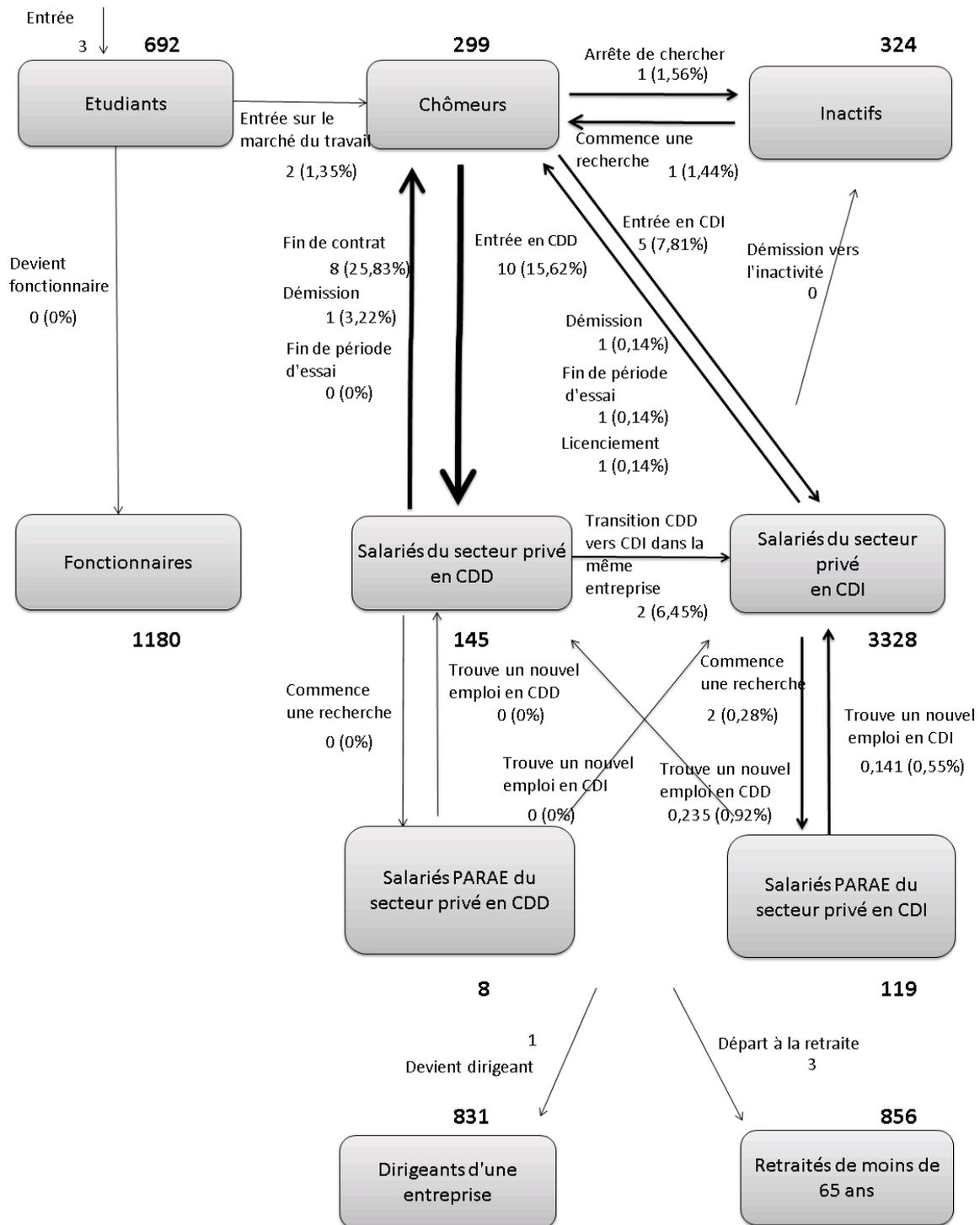


FIGURE 4 – Diagramme de flux Cadres

Annexe I : Évaluation du contrat de génération

Nous présentons ici une étude du contrat de génération réalisée *ex ante* avec une version antérieure du modèle WorkSim. Cette étude est à paraître dans la *Revue Économique*.

Modélisation du contrat

Le contrat de génération a été présenté comme une mesure phare contre le chômage. La loi sur le CG a trois objectifs, faire recruter des jeunes en CDI, maintenir (voire faire recruter) des seniors, inciter à des transferts de connaissances. Il constitue un dispositif novateur sur le plan des mécanismes économiques de lutte contre le chômage, avec un élément essentiel au niveau conceptuel qui est ce transfert de connaissances, même si on ne peut assurer qu'il soit pleinement appliqué (pas de sanction en cas de non transmission). Cette originalité justifie notre choix. Toutefois, outre que l'analyse est *ex-ante*, ce travail est exploratoire, car l'ampleur de la transmission ne peut que faire l'objet de variantes. Cependant, le capital humain n'est pas arbitraire dans WorkSim, puisqu'il engendre pour un degré de transmission de référence une distribution des salaires qui est calibrée sur des données observées. On peut ensuite étudier les effets de variantes de transmission plus élevées ou plus faibles voire nulles.

Le contrat de génération créé par la Loi n° 2013-185 du 1er mars 2013 portant création du contrat de génération, comporte les dispositions essentielles suivantes : a/ l'entreprise embauche un jeune de moins de 26 ans en CDI. b/ il constitue un binôme avec un senior de 57 ans et plus qui doit être maintenu dans l'emploi. Si ce senior est recruté, il peut avoir 55 ans minimum. c/ L'État verse, mais uniquement aux entreprises de moins de 300 salariés une prime annuelle de 4000 euros sur une durée de 3 ans. d/ l'entreprise ne doit pas avoir effectué de licenciement économique sur le poste dans les 6 mois précédents. e/ Le salarié senior ne peut être licencié sans mettre fin au CG. f/ Les entreprises de 50 à 300 salariés doivent en outre valider un plan d'action avec des engagements chiffrés en matière d'embauche des jeunes, et d'emploi de salariés âgés ou bien être couvertes par un accord de branche relatif au CG. g/ les entreprises de plus de 300 salariés doivent établir un accord collectif avec les représentants des salariés ou un plan d'action validé par l'État, sous la menace d'une pénalité financière qui peut atteindre 1% de la masse salariale.

En résumé le processus est incitatif pour les entreprises de moins de 300 salariés, et repose sur la sanction financière pour les entreprises de plus de 300 salariés. Pour les entreprises entre 50 et 300 salariés, il utilise les deux outils puisqu'il impose un plan d'action ou un accord de branche. Cependant Garoche et Goin (Garoche et Goin, 2015) montrent que les engagements relatifs à l'embauche des jeunes suite à la mise en œuvre de la loi sur le CG sont globalement inférieurs aux embauches réalisées au cours des dernières années. La teneur des engagements sur les seniors est également peu contraignante. Nous considérons donc qu'il est inutile de prendre en compte les règles f et g qui sont par ailleurs impossibles à modéliser *ex ante*. Dans le modèle les entreprises de plus de 300 salariés ne recourent pas au CG et les entreprises de plus de 50 n'ont pas d'obstacle administratif. Ces deux hypothèses peuvent expliquer une partie de la faiblesse du recours au CG observé par rapport à nos résultats, en considérant que les entreprises de moins de 50 salariés doivent aussi considérer qu'il y a un coût administratif même s'il est moindre.

Afin de modéliser le CG dans le cadre de WorkSim, nous commençons par ajouter la prime du CG dans l'estimation du profit attendu, lors des décisions de création éventuelle de poste en CG. Cela pourra conduire l'entreprise à chercher à embaucher en CG plutôt qu'en CDI. Par ailleurs, nous modifions les fonctions de production des salariés impliqués : celle du senior et celle du junior. Les règles a, b, c, d et e sont implémentées.

La modification des fonctions de production peut se faire avec de très faibles modifications, s'inspirant de l'analyse de la coopération entre deux travailleurs (Drago et Turnbull, 1988) et du concept de multi-tâches (Holmstrom et Milgrom, 1991). Le senior i consacre une fraction $a1_i$ de son temps de travail à la production et une fraction $a2_i = 1 - a1_i$ à la transmission de ses connaissances au junior, pendant 3 ans maximum.

Cette baisse de production effective pose toutefois des problèmes de fixation du salaire et d'évaluation. Le senior ne transmettrait pas son savoir s'il n'était pas rémunéré de manière au moins égale pour cette activité (principe d'égalité des incitations dans la théorie multi-tâches) et si l'entreprise ne prenait pas en compte ce temps consacré à la formation du junior dans ses évaluations du senior pour un licenciement par exemple. Le salaire comme la production estimée par l'entreprise lors des évaluations du senior doivent donc être basés sur la productivité correspondant à l'affectation du temps total de travail. Le junior bénéficie d'un accroissement de son capital humain général, de son capital humain de CSP, et de son capital humain spécifique par la transmission du senior. Il n'est pas vraisemblable qu'un salarié puisse transmettre toute son expérience à un junior. Le savoir est en partie tacite, ce qui n'empêche pas une transmission par observation du junior, mais tout le savoir ne peut être montré, ou en tout cas compris. Par ailleurs une autre partie du savoir est codifiée, mais son acquisition relève en partie de formations formelles qui ne sont pas données par le senior. Ce savoir ne sera acquis par le junior que si l'entreprise finance une formation pour le junior. Ceci est possible mais ne fait pas partie du CG. On supposera donc que le montant maximum de connaissances transmises est égal à la fraction du temps consacré par le senior au junior, multipliée par le capital humain général et spécifique du senior. On considérera aussi que cette transmission se fait de manière continue pendant les 3 années, et de manière égale pour le capital humain général, le capital humain spécifique à la CSP et celui spécifique au poste.

Par conséquent l'expérience générale du junior, son expérience au niveau de CSP q et son expérience spécifique dans le poste p augmentent plus rapidement que pour un même individu qui n'est pas en contrat de génération : elles augmentent d'un facteur supplémentaire lié à la transmission du savoir par le senior i au junior. Cette transmission est possible uniquement dans le cas où le senior plus d'expérience que le junior. Dans ce cas :

$$Experience_{junior,t+1} = Experience_{junior,t} + 1 + \delta_i \times a2_i \times Experience_{senior,t} \quad (41)$$

$$Experience_{junior,q,t+1} = Experience_{junior,q,t} + 1 + \delta_i \times a2_i \times Experience_{senior,q,t} \quad (42)$$

$$Ancien_{junior,j,p,t+1}^{spec} = Ancien_{junior,j,p,t}^{spec} + 1 + \delta_i \times a2_i \times Ancien_{senior,j,p,t}^{spec} \quad (43)$$

Le paramètre a_{2i} est la part de temps de travail moyen consacré par le senior à la transmission de son expérience. L'efficacité de cette transmission δ_i est obtenue par un tirage uniforme dans l'intervalle $[0,1]$ pour chaque nouveau CG. Dans un premier temps pour notre simulation de référence, nous supposons que $a_{2i} = 30\%$ et $\delta_i = 1/156$, de manière à ce qu'en moyenne un senior transmette au maximum 30% de son expérience pendant les 3 ans que dure le programme. On rappelle que ces niveaux d'expérience et d'ancienneté du junior entrent dans la détermination de sa production effective, cf. équation 2.30.

Évaluation ex-ante de l'impact agrégé du contrat de génération dans WorkSim

Nous effectuons 500 simulations avec le contrat de génération et 500 simulations sans le contrat de génération, à horizon de 5 ans (260 périodes d'une semaine dans le modèle) à partir de la sauvegarde du modèle en état stationnaire. Pour chaque simulation, les sorties du modèle (taux de chômage, taux d'emploi...) sont moyennées sur la dernière année du programme. Au cours de chacune de ces simulations, nous atteignons le plafond de 100 000 créations de contrats de CG par an (plafond fixé dans les pouvoirs publics). Dans la réalité le taux de recours n'a pas dépassé le tiers du plafond, du fait probablement des obstacles administratifs mais aussi d'une crainte très forte de l'avenir qui dissuade les employeurs d'embaucher les jeunes chômeurs en CDI au delà du calcul économique dans le modèle⁴.

Nous avons aussi fait un test de robustesse concernant les paramètres exogènes a_{2i} et δ_i , qui entrent en jeu dans la transmission de ses connaissances au junior. Il n'y a aucun impact significatif de ces paramètres sur les résultats généraux du CG à cet horizon de 5 ans. Nous montrons cependant dans la suite de ce papier que ces aspects de transmission de compétence ont un impact à plus long terme sur la carrière des cohortes de jeunes qui bénéficient du programme. Comme on le voit sur le tableau 6, le calcul ex ante de l'impact net du CG après 5 ans réduit globalement le chômage de 33 000 personnes avec 100 000 contrats CG signés par an pour en tout 175 000 contrats CG en vigueur en moyenne dans la dernière année du programme. A noter que ces 175 000 contrats CG correspondent à 175 000 juniors et 175 000 seniors en contrat CG. Si on ramène le nombre de chômeurs évités sur le nombre de contrats en vigueur, on en déduit une efficacité nette du programme de 18.9% seulement.

4. l'étude d'impact de l'Assemblée Nationale (Assemblée-Nationale, 2012) note que le recours des entreprises à des CDI pour les jeunes est très sensible à la situation conjoncturelle du marché du travail (p.25).

	sans CG	avec 100 000 CG	Impact
Taux de chômage global	9,25%	9,15%	-0,10%**
Taux d'activité	70,88%	70,87%	-0,01%
Taux d'emploi	64,32%	64,38%	+0,06%**
Taux d'emploi vacant	4,74%	4,62%	-0,12%**
Nombre de chômeurs en milliers	2 676	2 643	-33**
Nombre d'emplois en milliers	26 249	26 281	+32**
Nombre de contrats CG en milliers	0	175	+175**

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 6 – Résultats de l'impact global du CG au bout de 5 ans. Chaque ligne du tableau correspond à la moyenne sur la dernière année.

L'impact du CG est calculé aussi sur les tranches d'âge 15-29 ans, 30-49 ans et 50-64 ans. Pour l'analyse des effets du CG sur les jeunes, nous choisissons dans la suite de ce document de travailler sur la tranche 15-29 ans au lieu de 15-24 ans, car le contrat de génération s'adresse à des jeunes jusqu'à 26 ans, et comme le contrat est prévu pour durer 3 ans, des individus peuvent être en contrat CG jusqu'à 29 ans.

	sans CG	avec 100 000 CG	Impact
Taux de chômage 15-29 ans	20,12%	19,74%	-0,38%**
Taux de chômage 30-49 ans	5,62%	5,63%	+0,01%
Taux de chômage 50-64 ans	5,98%	5,95%	-0,03%**
Nombre de chômeurs 15-29 ans en milliers	1 414	1 384	-30**
Nombre de chômeurs 30-49 ans en milliers	767	769	+2
Nombre de chômeurs 50-64 ans en milliers	495	490	-5**

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 7 – Impact du CG par catégorie d'âge

Nous observons que l'impact du CG concerne bien majoritairement les jeunes, avec 30 000 chômeurs évités, soit 86% des chômeurs évités avec le programme, mais aussi les seniors qui sont gardés en emploi plus longtemps avec la mesure, avec 5 000 chômeurs en moins et 14% des chômeurs évités grâce au programme.

On observe de manière générale que la réduction calculée du chômage des jeunes grâce au contrat de génération n'est pas due à une amélioration des entrées en emploi, mais plutôt à une amélioration de la durée de l'emploi, avec moins d'embauche en CDD et des contrats en CDI qui durent plus longtemps (leur durée moyenne passe de 86 à 90 semaines), ce qui explique que le taux de rotation des jeunes passe de 1,01 à 0,97, avec un effet positif significatif de diminution des épisodes courts de chômage entre des contrats précaires (-4% sur le nombre d'épisodes de chômage de 2 semaines à 2 mois rencontrés par les 15-29 ans). Le coût de la mesure pour le plafond de 100 000 contrats par an est calculé dans notre modèle. Il correspond à la totalité des primes des contrats de génération qui auraient été versées aux entreprises pendant le programme. Ce coût est de 3,1 milliards d'euros sur les 5 ans que dure

le programme, soit un coût du même ordre que celui de 2,3 Mds pour 4 ans indiqué dans l'étude d'impact (Assemblée-Nationale, 2012). Nous en déduisons un coût de la mesure par an de 625 millions d'euros. En ramenant ce coût au nombre de chômeurs évités de 33 000 par an, nous obtenons un coût brut de 18 925 euros par chômeur évité et par an. Ces 33 000 chômeurs évités permettent d'économiser 186 millions d'euros de prestations sociales (RSA et allocations chômage), ce qui correspond à 5 654 euros par chômeur par an. Par ailleurs ces chômeurs évités cotisent pour 297 millions d'euros supplémentaires chaque année, ce qui correspond à 8 998 euros par chômeur évité. Nous obtenons donc un coût net de la mesure d'environ 4 273 euros par an et par chômeur évité.

Pour avoir une idée de l'efficacité du contrat de génération compte tenu de son coût, nous le comparons aux politiques d'allègements de charge. Le document de la direction du Trésor (Cyril et Benoît, 2012) synthétise en 2012 les résultats de différentes études sur les effets des politiques d'allègement de charge sur la période 1993 à 2009. Il en ressort une fourchette pour les effets sur l'emploi : le « coût brut par emploi créé aurait ainsi été compris entre 20 000 euros et 40 000 euros exprimés en euros de 2009, pour 200 000 à 400 000 emplois créés ou sauvegardés ». Nous avons également simulé cet allègement des charges dans WorkSim, et obtenons des chiffrages similaires avec environ 325 000 emplois créés pour un coût brut par emploi net de 54 193 euros et un coût net de 39 541 euros en tenant compte des cotisations sociales supplémentaires et des économies de prestations sociales des emplois créés. Le coût plus élevé dans WorkSim peut être dû au fait que l'on y tient compte uniquement de ce qu'en réponse à une hausse idiosyncratique de sa demande, une firme trouve plus souvent profitable d'ouvrir un emploi à pourvoir. Il n'y a pas de stimulation de cette demande par une baisse de prix, ni de substitution du travail au capital.

Dans nos simulations, nous observons que le programme du contrat de génération a un effet beaucoup plus modeste sur l'emploi avec seulement 32 000 emplois créés. Par contre, c'est un programme qui pèse beaucoup moins lourd pour les finances publiques, avec un coût de 625 millions d'euros par an contre 22 milliards d'euros par an pour les allègements de charge. Le coût brut par emploi net créé (le nombre d'emplois créés diffère de 1000 du nombre de chômeurs évités) avec le contrat de génération est de 19 516 euros. Il est donc beaucoup plus faible que le coût brut de 54 193 euros par an des allègements de charge.

Si les 500 000 contrats prévus par le dispositif étaient un objectif crédible, le programme du contrat de génération serait très rentable par rapport à une politique d'allègement de charge, bien qu'ayant un impact global faible.

Études au niveau microéconomique des contrats CG - Pourquoi un faible impact du programme même avec un recours maximal des employeurs ?

Nous avons vu dans la partie précédente que les impacts du contrat de génération étaient limités et que le ratio du nombre de chômeurs évités ramené au nombre de contrats signés était faible (18.9% en moyenne sur la dernière année).

Nous souhaitons maintenant « descendre » au niveau des agents du modèle pour caractériser le contrat de génération au niveau microéconomique et tenter d'expliquer d'où vient cette faible efficacité du programme.

C'est ici un apport important de la modélisation du marché du travail avec un système

multi-agent, qui permet d'analyser finement les effets d'éviction entre les différentes catégories de main-d'œuvre, ainsi que les comportements et les trajectoires individuelles : motifs d'entrées et de sortie de ce contrat, effets d'aubaine, répercussions du contrat de génération sur les carrières des individus qui en bénéficient. Par ailleurs, la démarche suivie s'apparente à une expérience naturelle qui est assez nouvelle dans un modèle à base d'agents.

Dans le modèle, 67% des entrées en CG se font par recrutement externe et 33% par titularisation en interne d'un employé en CDD vers un contrat CG.

Nous mesurons les effets d'aubaine pour les entreprises, en comptant pour chacun de ces types d'entrée en CG, titularisation et recrutement externe, les cas où les embauches en contrat indéterminé auraient été réalisées de toute façon sans l'incitation de la prime versée par l'État (i.e. en mesurant le nombre d'embauches pour lesquelles le profit attendu dépasse le montant de la prime). On divise ce chiffre par le nombre d'embauches en CG. Nous mesurons un effet d'aubaine global du CG de 89%.

L'étude d'impact du contrat de génération par l'Assemblée Nationale (Assemblée-Nationale, 2012) (p.27) estime que la durée moyenne des contrats de génération sera légèrement inférieure à deux ans et demi, compte tenu des départs des jeunes avant la fin du contrat. D'après les résultats de WorkSim, il semble que cette durée soit surestimée à cause de l'ensemble des motifs de fin possible du contrat pouvant venir aussi bien de l'employeur que des employés en contrat de génération, junior comme senior. Nous mesurons dans le modèle une durée moyenne passée en CG par les jeunes de 17,5 mois soit environ la moitié des 36 mois maximum financés par le programme.

Les raisons de fin des contrats de génération dans le modèle sont les suivantes :

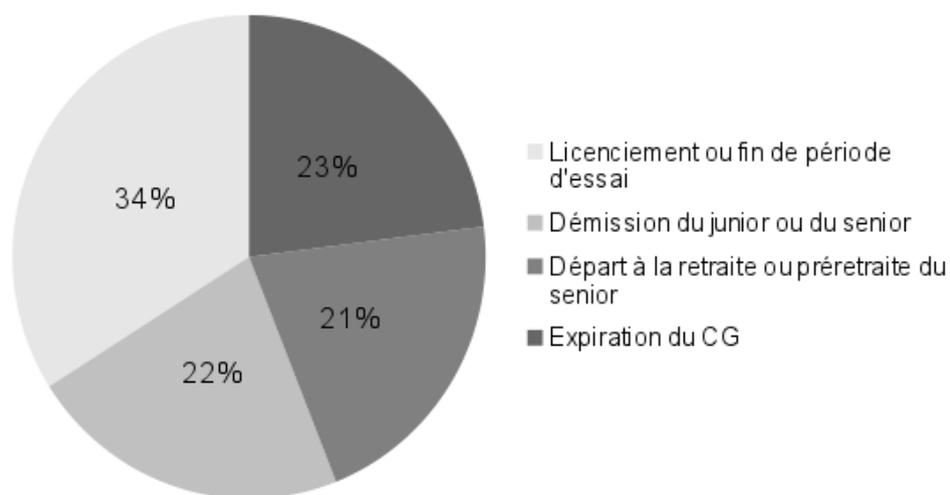


TABLE 8 – Motifs des raisons de fin du contrat de génération dans le modèle

Environ trois quarts des contrats de génération expirent avant leur terme pour les motifs suivants :

- 22% à cause d'une démission du junior ou du senior (parmi ces démissions 80% sont des démissions des juniors). Ceci vient du fait que nous comptons en proportion à peu près autant de démissions d'employés en CG que de démissions d'employés en CDI dans le

modèle, car du point de vue du salarié, le CG est vu comme un CDI standard, hormis les bénéfices éventuels de la transmission du capital humain et des augmentations de salaires qui en résultent (intégrées dans le modèle). La part de jeunes en CG à la recherche d'un autre emploi (PARAE) est sensiblement équivalente à celle de la part de jeunes en CDI à la recherche d'un autre emploi (environ 5%).

- 21% à cause d'un départ à la retraite du senior.
- 34% à cause d'un licenciement ou d'une fin de période d'essai du junior ou du senior. Il n'y a en effet aucune mesure dans la loi qui empêche les entreprises de licencier ou de mettre fin à une période d'essai associée à un contrat de génération. Dans le modèle, le taux cumulé des licenciements et des fins de période d'essai des CG est néanmoins inférieur de 8,7% relativement à celui des CDI « standards », car les entreprises prennent en compte la perte de la prime du contrat de génération versée par l'État en cas de rupture du contrat.

Pour déterminer les profils des jeunes qui entrent en CG, nous effectuons 500 simulations avec l'introduction de la mesure à partir de la sauvegarde du modèle en état stationnaire. Pour chaque simulation, nous relevons les identifiants et les caractéristiques des agents individus âgés de 15 à 26 ans qui entrent en CG la première année du programme, ce groupe est appelé « Groupe bénéficiaire du CG ». Nous relevons en parallèle les caractéristiques d'un groupe de jeunes de la même taille tirés aléatoirement et avec la même distribution d'âge que ce groupe de bénéficiaires, et ce groupe constitue le « Groupe moyen »

La comparaison de ces deux groupes permet de mesurer les écarts de caractéristiques des jeunes qui bénéficient du CG la première année du programme par rapport à l'ensemble de la population du même âge.

	Groupe bénéficiaire du CG	Groupe moyen
Part d'employés/ouvriers	30,2%	64,9%
Part de professions intermédiaires	36,2%	29,2%
Part de cadres	33,6%	5,9%
Capital humain moyen des individus	250	101
Noyau de productivité	0,98	1,0
Alpha	0,31	0,51

TABLE 9 – Moyenne des caractéristiques des deux groupes au moment de l'introduction de la mesure

Nous remarquons que les individus qui entrent en CG ont des niveaux de CSP supérieurs à la moyenne et sont caractérisés par un capital humain plus important. Cela vient du fait que pour passer la norme d'embauche et entrer en CG, les exigences sont les mêmes que pour un CDI, hormis l'effet de la prime qui facilite l'embauche mais n'interdit nullement la sélection. Ces observations sont cohérentes avec les effets d'aubaine importants que l'on mesure dans le modèle et suggère qu'une amélioration de l'impact du contrat de génération pourrait passer pas un meilleur ciblage du programme sur les catégories de jeunes les plus vulnérables.

Analyse de la transmission de compétences sur les parcours individuels

Nous reprenons dans cette étude le *Groupe bénéficiaire du CG* constitué des individus qui ont bénéficié du CG lors de la première année du contrat. Nous analysons les individus de cette cohorte tout au long de leurs carrières avec l'introduction du contrat de génération, puis nous reprenons ces mêmes individus et nous analysons leurs trajectoires dans le cas où le programme du contrat de génération n'est pas introduit. Dans chacune de ces expériences, les agents « partent » du même état initial avec rigoureusement les mêmes valeurs des variables internes grâce au fichier de sauvegarde du modèle (Cf. partie calibrage/initialisation). Nous répétons ce protocole 500 fois, de manière à calculer des écarts statistiques significatifs sur un total de 10 000 trajectoires d'individus.

Cette étude permet de montrer de façon précise l'impact spécifique du programme du CG sur les individus qui en bénéficient pendant la durée du contrat, mais aussi les répercussions tout au long de leurs carrières dues au fait qu'ils ont été plus facilement intégrés en contrat stable sur le marché du travail et ont reçu du capital humain grâce à la formation du senior.

Nous présentons ci dessous les taux d'emploi pendant 20 ans du *Groupe bénéficiaire du CG* dans le cas où le CG n'est pas introduit (courbe en ligne continue) et dans le cas où le CG est effectivement introduit (courbes en pointillé) pour ce même groupe avec différentes efficacités de transmission δ_i fixées de manière avoir une transmission d'expérience de 0%, 30% et 60% de l'expérience du senior pour le junior sur les trois ans que dure le programme (Cf. équation 41, 42 et 43) :

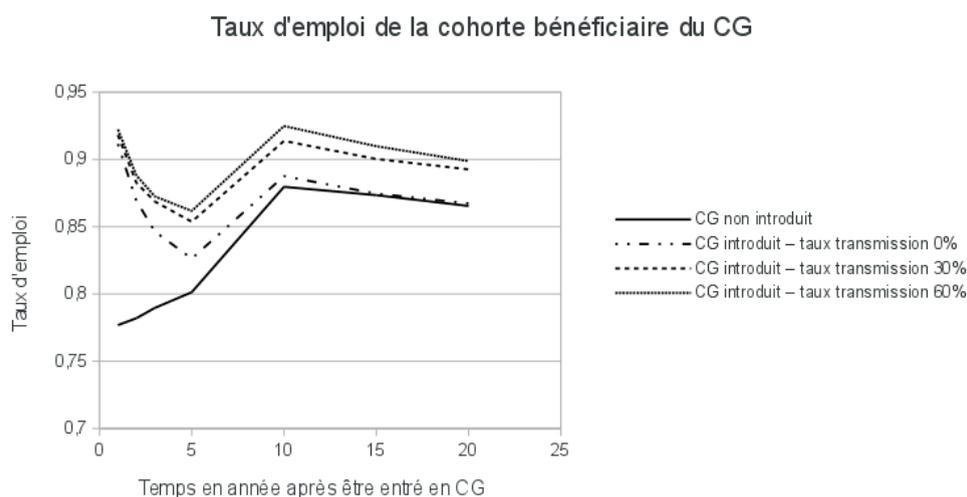


FIGURE 5 – Taux d'emploi du *Groupe bénéficiaire du CG* - Simulations avec et sans CG

L'introduction du CG augmente de manière significative les taux d'emploi du *Groupe bénéficiaire du CG*. Les courbes de taux d'emploi dans le cas où le CG est introduit marquent un creux à 5 ans, car une partie des individus du *Groupe bénéficiaire du CG* sont sortis du CDI qui a bénéficié du CG. Un écart persiste après le programme du CG, ce qui montre l'impact positif du programme tout au long de la carrière pour ces jeunes bénéficiaires du CG. On remarque que plus les jeunes ont reçu d'expérience de la part du senior pendant les trois ans que dure le programme, plus les bénéfices du CG perdurent longtemps après la sortie du

programme (courbes en pointillé). Toutefois, l'augmentation du taux de transmission dans la plage 30-60% ne semble pas modifier significativement les résultats.

Cette caractérisation quantitative de l'emploi des jeunes qui bénéficient du CG se double d'une amélioration qualitative de leurs emplois, car la part de ces individus en emploi de type CDI s'améliore de façon significative jusqu'à la fin de leurs carrières.

	1 ans	2 ans	5 ans	10 ans	15 ans	20 ans	30 ans
Sans CG	82,4%	85,7%	85,8%	87,4%	90,1%	91,7%	93,4%
Avec CG	96,74%	95,2%	93,6%	93,4%	93,4%	94,5%	95,6%
Écart	+14,37%**	+9,55%**	+7,73%**	+5,96%**	+3,45%**	+2,83%**	+2,22%**

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 10 – Part de CDI dans l'emploi des individus du *Groupe bénéficiaire du CG* - Simulations sans CG et avec CG - taux de transmission CG de 30%

Des effets d'éviction vis à vis des autres jeunes

Nous constituons la cohorte du *Groupe non bénéficiaire du CG* qui comprend les individus de la même génération mais qui ne bénéficient jamais du CG. Nous remarquons que cette cohorte est pénalisée en termes de taux d'emploi par l'introduction du CG, ce qui montre un effet d'éviction du programme sur cette cohorte :

	1 ans	2 ans	5 ans	10 ans	15 ans	20 ans	30 ans
Sans CG	50,7%	58,4%	72,4%	82,8%	82,8%	83,8%	82,6%
Avec CG	50,6%	57,7%	72,1%	82,4%	82,4%	83,4%	82,1%
Écart brut	-0,1%*	-0,7%**	-0,30%**	-0,4%**	-0,4%**	-0,4%**	-0,5%**

* Écart significatif au seuil de 5% du test de Student

** Écart significatif au seuil de 1% du test de Student

TABLE 11 – Taux d'emploi des individus du *Groupe non bénéficiaire du CG* - Simulation sans CG et avec CG - taux de transmission de 30%

Nous observons par ailleurs dans le modèle des effets négatifs significatifs de l'introduction du contrat de génération sur les critères qualitatifs de l'emploi pour ce *Groupe non bénéficiaire du CG*, au niveau des salaires, de la proportion des CDI dans leurs emplois et du nombre de promotions au cours de leurs carrières notamment.

Ces effets négatifs sur ce *Groupe non bénéficiaire du CG* ne sont cependant pas suffisamment importants pour contrebalancer les effets positifs observés ci-dessus pour le *Groupe bénéficiaire du CG*, comme le montrent les impacts globaux du programme du CG déjà mentionnés.

Variantes du contrat de génération

Un des facteurs limitant de l'impact du contrat de génération est la durée courte, de 17,5 mois en moyenne, passée par les individus en CG à cause notamment des motifs de fin de

période d'essai ou de licenciement personnel qui peuvent provoquer un arrêt du contrat avant sa date d'expiration. En effet, dans la loi rien n'empêche les employeurs de mettre fin au contrat CG si le jeune ou le senior ne sont pas productifs, et la prime de 4 000 euros par an n'est pas toujours suffisante pour les en dissuader. Un mécanisme d'incitation réaliste dans le cadre de la loi pour les amener le plus possible « à jouer le jeu » et à conserver les individus en CG plus longtemps serait donc d'augmenter cette prime associée au contrat. Nous avons donc testé le cas où la prime du contrat de génération versée par les pouvoirs publics serait trois fois plus importante et passerait à 12 000 euros par an et par contrat. Nous observons une augmentation des durées passées en CG, qui passent de 17,5 mois à 21 mois en moyenne. Il y a aussi moins d'effets d'aubaine au moment du recrutement, on passe de 89% à 73%, car cette prime plus importante est maintenant plus décisive pour amener les entreprises à créer des postes qu'elles n'auraient pas pu créer sans l'incitation financière. L'impact sur le chômage est 1,57 fois meilleur avec 52 000 chômeurs en moins au lieu de 33 000 avec le CG « standard ». Cependant le coût du programme est maintenant plus de trois fois supérieur, à cause de l'augmentation de la prime et de l'augmentation des durées passées en contrat de génération. Donc le coût du programme par chômeur évité augmente fortement.

Un autre facteur limitant du contrat de génération que nous avons montré dans cet article est le mauvais ciblage du programme sur des jeunes qui ne sont pas les plus vulnérables. Nous testons donc une variante du contrat de génération réservé uniquement aux jeunes qui sont en chômage depuis plus de 6 mois. Nous remarquons que dans ce cas le contrat de génération a un meilleur impact sur le chômage des jeunes avec 36 000 chômeurs en moins plutôt que 33 000 chômeurs en moins avec le CG « standard », par contre il y a un fort effet d'éviction notamment sur la catégorie des 30-64 ans avec 32 000 chômeurs en plus. Ceci s'explique par le fait que les entreprises ont plus de mal à pourvoir leurs postes en contrat de génération, car les jeunes au chômage depuis plus de 6 mois sont moins employables. Or, nonobstant l'effet de la prime incitative prise en compte par les entreprises, les postes en CG sont caractérisés par des normes d'embauche aussi importantes que pour des CDI « standards ». Donc les difficultés de recrutement en CG s'accroissent et l'ancienneté de vacance des emplois en CG augmente de 1,9 semaine à 8,5 semaines, ce qui a un impact sur l'ensemble des catégories de main d'oeuvre, car des emplois qui auraient pu être pourvus par les autres catégories d'âge sont « bloqués », en attente de l'embauche des meilleurs parmi ces jeunes au chômage depuis plus de 6 mois. En parallèle, un autre effet négatif apparaît avec cette variante. Il s'agit de la diminution du temps passé en CG qui passe de 17,5 à 13 mois, car ces individus qui étaient au chômage depuis plus de 6 mois sont en moyenne les moins productifs et ils sont donc plus souvent licenciés avant l'expiration du CG. Malgré l'amélioration de l'impact du programme sur les jeunes, l'impact général de cette variante est donc globalement négatif avec une augmentation du taux de chômage global compte tenu du renforcement du chômage frictionnel dans le modèle.

Un autre ciblage du contrat de génération que nous testons dans notre modèle est de réserver le contrat de génération à des salaires proposés proches du SMIC. Avec cette variante, nous observons que plus on diminue le plafond de salaire d'éligibilité, moins il y a de chômeurs dans la catégorie des 15-29 ans (-50 000 lorsque le plafond est de 1,2 SMIC), mais plus il y a de chômeurs dans la catégorie des 30-64 ans (+16 000). On trouve un renforcement des

effets d'éviction, ce qui fait qu'on ne mesure pas d'amélioration significative du rendement du programme au niveau global.

En effet, les coûts de licenciement rendent peu rentables les recrutements en CDI à des salaires proches du SMIC. Les entreprises, du fait de leur norme d'embauche, voient donc augmenter l'ancienneté moyenne des postes vacants en CG (qui passe de 1,9 à 5,7 semaines avec un seuil à 1,2 SMIC), et donc le taux de vacance général des emplois (qui passe de 4,72% à 4,80%). Cette augmentation du taux de vacance induit une augmentation du chômage frictionnel dans le modèle qui pénalise toutes les catégories de main d'oeuvre.

Par ailleurs, avec cette restriction du CG sur les bas salaires, nous remarquons un effet de « trappe à bas salaire » avec une destruction des postes qualifiés au profit de postes moins qualifiés. Ainsi lorsqu'on passe d'un CG sans plafond à un CG avec un plafond à 1,2 SMIC, il y a au niveau global 15 000 emplois d'employés/ouvriers en plus, pour 12 000 postes de professions intermédiaires en moins et 2 000 postes de cadres en moins (rappelons que les professions intermédiaires et les cadres ne diffèrent des employés/ouvriers que par leurs niveaux de productivité dans le modèle).

Annexe J : Propositions pour appliquer WorkSim au Sénégal

Dans cette annexe, nous souhaitons donner des pistes qui permettraient d'étendre le modèle WorkSim pour étudier le marché du travail sénégalais. Cette thèse s'inscrit en effet dans le cadre d'une collaboration avec le Sénégal. Elle est financée par le Programme Doctoral International pour la Modélisation des Systèmes Complexes (PDI-MSC) de l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD). Il s'agit d'initier un travail similaire à WorkSim au Sénégal.

Le modèle WorkSim a été conçu de façon à ce que le cœur de son modèle économique ainsi que son cadre théorique soient transposables pour l'étude du marché du travail d'un autre pays, avec des concepts et des mécanismes suffisamment généraux comme : la modélisation du capital humain, les besoins de main d'œuvre par niveau de qualification, la diffusion d'offres d'emploi, le processus de recrutement, les décisions des individus reposant sur l'évaluation de fonctions d'utilité.

Certaines parties du modèle sont néanmoins spécifiques à l'étude du marché du travail français et doivent être adaptées pour l'étude d'un autre pays. Ces principales adaptations, qui permettent de définir une grille de modifications à apporter, sont les suivantes :

1. La mise à jour des données exogènes du modèles : données démographiques sur la structure de la population, sur les ménages...
2. L'implémentation du cadre institutionnel du pays étudié
3. La prise en compte de nouveaux statuts, acteurs ou secteurs spécifiques du marché du travail

Dans cette annexe, nous proposons d'illustrer l'application de cette grille de modification avec l'exemple du marché du travail sénégalais.

D'après l'agence nationale de la statistique et de la démographie du Sénégal ((ESP, 2011)), le taux de chômage au sens du BIT⁵ au Sénégal s'élève à 10,2% en 2011. Ce taux de chômage est relativement modéré si on le compare par exemple au taux de chômage dans l'union européenne de 9,4%. Toutefois il masque un ensemble de situations d'emploi très précaires. En effet une personne sur cinq seulement travaille à temps plein et le taux de pauvreté atteint presque 50% des ménages d'après le rapport de la banque mondiale ((Banque Mondiale, 2007)). Le marché du travail sénégalais souffre aussi de nombreux dysfonctionnements. En effet, d'après ce même rapport, le marché du travail sénégalais est caractérisé par un important secteur informel dans lequel les employés n'ont ni contrat, ni couverture sociale et dont le salaire médian est de 68 dollars par mois.

L'un des principaux défis pour les autorités sénégalaises est de réguler ce secteur pour permettre ainsi que les travailleurs bénéficient de contrats écrits, d'un salaire minimum et d'une couverture sociale. Un autre défi important vise à développer le milieu rural et gérer le flux de migration rural-urbain, afin de rééquilibrer le marché du travail et de diminuer l'afflux de pauvreté vers les villes.

5. Un chômeur au sens du BIT doit remplir les trois condition suivantes : ne pas avoir travaillé une heure au cours des 7 derniers jours, être activement à la recherche d'un emploi et être disponible pour occuper un emploi dans les 15 prochains jours.

Du point de vue de la théorie, un point central pour modéliser l'économie des pays en développement, et que l'on retrouve dans le cas du Sénégal est la notion de double dualité du marché du travail : dualité entre le secteur formel et le secteur informel, mais aussi une dualité entre le milieu rural et le milieu urbain. (Harris et Todaro, 1970) proposent une modélisation de la mobilité entre ces secteurs qui est reprise depuis dans de nombreux modèles économiques des pays en développement. L'idée de cette fonction dite de "Harris-Todaro" est que le taux de mobilité d'un milieu à un autre dépend du différentiel de salaire attendu entre les deux milieux. Les travailleurs fondent leur décision de migrer sur une comparaison entre les utilités attendues des emplois dans chacun des deux secteurs (Zerbo, 2006).

Du point de vue des applications au marché du travail sénégalais, on distingue deux groupes de modèles dans la littérature.

Le premier groupe est constitué d'études *ex-post* avec des modèles économétriques pour comprendre les déterminants de l'emploi. Le modèle économétrique de (Goldsmith *et al.*, 2004) étudie spécifiquement les migrations entre le milieu rural et le milieu urbain. Il s'appuie sur le cadre théorique présenté ci-dessus avec cette fonction de "Harris-Todaro". Les auteurs montrent qu'une politique publique qui réduit les écarts de salaire entre le secteur rural et le secteur urbain *via* notamment une politique d'investissement dans l'agriculture, permet de réduire les flux de migration rural-urbain, ce qui permet de moins perturber le marché du travail urbain et de réduire la pauvreté. Un autre modèle récent qui met en œuvre cette théorie de la segmentation est celui de (Nordman et Pasquier-Doumer, 2014). Ils modélisent les secteurs "public, privé formel, informel" et étudient le lien entre le niveau d'étude et la catégorie d'emploi obtenu chez les jeunes des pays d'Afrique de l'Ouest. Les auteurs montrent que c'est l'enseignement professionnel (plus encore que l'enseignement général) qui offre le plus de chance d'intégrer le secteur privé formel et d'obtenir un emploi avec un bon revenu. (Camara et Gueye, 2013) proposent un modèle économétrique complet qui intègre les quatre secteurs du marché du travail sénégalais : le public, le privé formel, l'informel et l'agricole. Les auteurs en déduisent que "les chances de trouver un emploi augmentent avec l'âge mais à taux décroissants", sauf dans le secteur agricole, dans lequel l'âge n'a pas d'impact significatif sur l'emploi. Ils montrent aussi que le fait d'être chef de ménage augmente les chances d'obtenir un emploi dans tous les secteurs du marché du travail.

Le deuxième groupe de modèles qui étudient le marché du travail sénégalais sont des modèles *ex-ante* d'équilibre général calculable (MEGC). Le premier modèle MEGC complet du Sénégal est développé par (Savard et Mesplé-Somps, 1996). Plus récemment, on peut citer des analyses sur la pauvreté et la distribution des revenus avec les modèles de (Decaluwé *et al.*, 1999; Boccanfuso *et al.*, 2007). Des MEGC ont aussi été développés pour étudier spécifiquement le rôle des transitions entre les secteurs du marché du travail (Marouani, 2002). Ils n'ont pas été appliqués pour le cas précis du Sénégal mais pour d'autres pays qui ont des économies similaires. Ainsi (Cogneau *et al.*, 1996) présentent une analyse du secteur informel urbain du Cameroun. Les transitions entre le secteur formel et le secteur informel sont modélisées toujours par cette fonction "Harris-Todaro". (Marouani, 2000) développe un MEGC de l'économie tunisienne avec une migration interne rural-urbain des travailleurs.

Ces MEGC présentent différentes limites. Avec ce type de modèle, il n'est pas possible de

reproduire des dynamiques au sein du marché du travail, comme par exemple l'accumulation de capital humain des travailleurs au cours de leur carrière ou les transitions des individus entre les différents secteurs de l'emploi. Ceci rend difficile l'adéquation de ces modèles avec les études économétriques menées sur le terrain qui soulignent notamment l'impact important des trajectoires individuelles sur l'accès à l'emploi ((Camara et Gueye, 2013)). D'autre part, les modèles MEGC modélisent le comportement d'un agent unique représentatif de ménage et d'un agent représentatif de firme, ce qui ne permet pas de rendre compte de la diversité des acteurs sur le marché du travail sénégalais, ni des phénomènes d'éviction entre les différentes catégories de main d'œuvre avec notamment le problème particulier au Sénégal de l'intégration d'un grand nombre de jeunes, souvent sans qualification, qui arrivent chaque année sur le marché du travail.

L'avantage d'une modélisation à base d'agents par rapport au modèle ex-ante MEGC est de pouvoir prendre en compte la grande hétérogénéité des individus, des entreprises et des secteurs, ce qui semble particulièrement pertinent dans le cas du Sénégal caractérisé par quatre secteurs du marché du travail différents (public, privé formel, informel et agricole). Ces secteurs obéissent chacun à des règles particulières et sont en constante interaction. L'intérêt de ce type de modèle multi-agent est aussi de pouvoir intégrer des résultats obtenus par les études économétriques sur les comportements des agents, à partir de données précises issues des enquêtes sur la situation de l'emploi dans le pays.

A ce jour aucun modèle multi-agent du marché du travail n'a été proposé pour modéliser le marché du travail sénégalais. Dans cette annexe, nous présentons comment la grille d'adaptation de WorkSim définie ci-dessus pourrait être mise en œuvre pour le Sénégal. Dans une première partie, nous présenterons quelles sources de données peuvent être utilisées pour mettre à jour les données démographiques et de ménage du modèle WorkSim. Dans une deuxième partie, nous préciserons quelles sont les adaptations du cadre institutionnel à appliquer. Dans une troisième partie, nous verrons quelles sont les spécificités du marché du travail sénégalais et nous proposerons un diagramme de flux caractérisant ce marché. Nous préciserons les nouveaux états et les nouvelles décisions des agents à modéliser par rapport à la version existante de WorkSim.

Mise à jour des données du modèle

Pour initialiser et faire évoluer le modèle WorkSim avec la situation du Sénégal, il est nécessaire de disposer de suffisamment de données fiables sur la structure de la population, des ménages et de l'emploi. D'après (SIM, 2011), une des sources les plus complètes et précises pour obtenir des indicateurs sur le marché du travail et la démographie au Sénégal est l'Enquête de Suivi de la Pauvreté au Sénégal réalisée par l'Agence nationale de la statistique et de la démographie. Cette dernière enquête a eu lieu en 2011 (ESPS II) (ESP, 2011), c'est la deuxième après l'enquête de 2005-06. Il s'agit d'une enquête importante par sondage aléatoire sur l'ensemble du pays. L'échantillon global de l'enquête porte sur environ 20 000 ménages dont environ les deux tiers sont en milieu urbain et un tiers en milieu rural.

Cette enquête comporte un grand nombre de données importantes pour WorkSim et qui seront reprises dans ce document. Elle est cependant principalement axée du côté des ménages. Du côté des entreprises, il pourra être intéressant d'utiliser la base de données sur

les entreprises de la Direction de la prévision et des études économiques (DPEE). Cette même institution met aussi à jour une base de données sur les effectifs de la fonction publique.

La structure de la population

Les données sur la répartition de la population selon le groupe d'âge, le sexe et le milieu de résidence peuvent être trouvées dans le document de l'ESPS-II au chapitre 2. Cette répartition de la population est résumée sur la pyramide des âges ci-dessous :

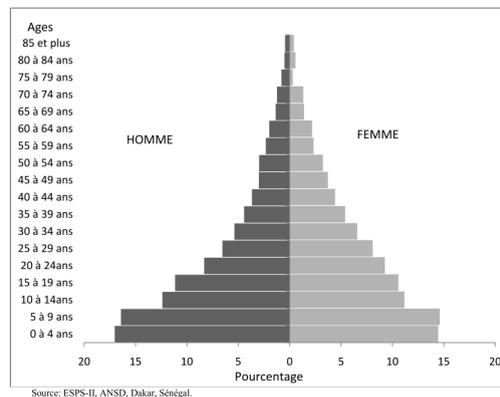


FIGURE 6 – Pyramide des âges au Sénégal en 2011

D'après l'ESPS-II, "cette structure par âge présente les caractéristiques d'une population très jeune : les moins de 20 ans représentent 53,8% de la population totale alors que les personnes âgées de 65 ans et plus comptent pour 4,2%". En 2011, les individus âgés de 15 à 24 ans représentent environ 25% de la population active au Sénégal. Le taux de chômage chez les jeunes est estimé à 12,7%, soit 2,5 points de pourcentage de plus que la population générale. De plus, ces nombreux jeunes qui entrent sur le marché du travail chaque année sont pour la plupart peu qualifiés et éprouvent des difficultés à s'intégrer dans des emplois stables du secteur formel.

Ces données sur la structure de la population dans le modèle WorkSim doivent contribuer à rendre compte du problème général de l'intégration des jeunes sur le marché du travail, lequel constitue un défi majeur pour le Sénégal.

Les ménages

D'après l'ESPS-II, la taille des ménages au Sénégal est plus importante qu'en France. Elle est de 9 personnes et diminue avec le niveau d'urbanisation. La répartition des chefs de ménage selon la situation matrimoniale est donnée dans la table 12 ci-dessous.

Par ailleurs il convient d'ajouter au modèle un nouveau statut de marié polygame par rapport à la France qui représente 29.8% des statuts des chefs de ménages au Sénégal et qu'il faut ajouter au modèle.

On rappelle que dans le modèle WorkSim les calculs d'utilité des agents intègrent les revenus des autres membres du ménage. La taille importante des ménages au Sénégal doit contribuer

Situation matrimoniale	Dakar Urbain	Autres villes	Rural	Ensemble
Marié(e) monogame	51.8	48.9	54.0	52.3
Marié(e) polygame	23.2	26.4	35.1	29.8
Célibataire	5.5	4.1	2.1	3.5
Veuf(ve)	15.3	16.7	8.0	11.9
Divorcé(e)	4.1	4.0	0.8	2.5
Concubinage/Union libre	0.1	0.0	0.0	0.1
Ensemble	100	100	100	100

TABLE 12 – Répartition des chefs de ménage selon la situation matrimoniale au Sénégal en 2011

à faire émerger dans le modèle la faible participation des individus sur le marché du travail en accord avec les données réelles. En effet en 2011, le taux d'activité au Sénégal est estimé à 54.4% avec une grande disparité entre les hommes et les femmes. Le taux d'activité des hommes est de 67.1% et celui des femmes de 43.9%.

Le cadre institutionnel du marché du travail sénégalais

Le modèle WorkSim a la particularité d'intégrer un cadre institutionnel très complet qui prend en compte les principaux éléments du code du travail, ainsi que les effets des décisions gouvernementales. Nous avons montré que les aspects légaux du marché du travail ont un impact très important sur le fonctionnement du marché du travail français. Les spécificités du marché du travail sénégalais doivent donc être intégrés dans le modèle avec une grande précision. Pour cela nous nous référons principalement à la loi LOI N° 97-17 du 1er décembre 1997 du code du travail sénégalais. A noter cependant que ce cadre institutionnel s'applique à la partie seulement des contrats du secteur formel de l'économie sénégalaise. Le secteur informel n'obéit pas à ce cadre légal. Nous proposerons une modélisation du secteur informel dans la section 7.4.

Deux contrats de travail

Il existe au Sénégal deux principaux types de contrats : le contrat à durée déterminée (CDD) et le contrat à durée indéterminée (CDI). Ces contrats peuvent être modélisés dans WorkSim exactement de la même manière que pour l'étude du marché du travail français, moyennant quelques ajustements mineurs.

Le contrat à durée déterminée Au Sénégal, le CDD est très proche du CDD français. Il présente les caractéristiques suivantes :

- il est renouvelable au maximum une fois (art. L.42) dans la limite de deux ans au Sénégal (art. L.44) à l'exception des entreprises de certains secteurs spécifiques qui peuvent conclure un CDD d'une période de cinq ans (Art.19-B,§2 du Code des Investissements).
- D'après l'article 48 du code du travail sénégalais, "il ne peut être mis fin avant terme à un contrat à durée déterminée qu'en cas de faute lourde, d'accord des parties constaté

par écrit, ou de force majeure".

- Comme en France, le CDD offre à l'employé une indemnité de fin de contrat s'il n'est pas embauché dans l'entreprise à l'issue de son contrat. Cette indemnité est égale à 7% du montant de la rémunération totale brute due au travailleur pendant la durée du contrat.

Le contrat à durée indéterminée Le contrat à durée indéterminée sénégalais est aussi très proche du contrat à durée indéterminée français :

- La législation du travail prévoit une période d'essai de 3 mois renouvelable 1 fois pour les cadres et 1 mois renouvelable 1 fois pour les non-cadres (cf. Convention Collective Nationale Interprofessionnelle (Ndoye, 1998)).
- La période du préavis est de 3 mois pour les cadres et d'un mois pour les travailleurs non cadres.
- D'après la convention Collective Nationale Interprofessionnelle (Ndoye, 1998), l'indemnité de licenciement en mois de salaire brut dépend de l'ancienneté du salarié. Ce pourcentage est fixé par année de services à 25% pour les 5 premières années, 30% pour les 5 années suivantes et 40% pour la période s'étendant au delà de la 10^{ème} année. On ajoute un mois de salaire dans le cas d'un licenciement économique.

Temps de travail et salaire minimum

D'après l'article L.135 du code du travail sénégalais, la durée légale du travail est de 40 heures par semaine.

Le décret n°96-154 du 19 février 1996 fixe les salaires minima interprofessionnels et agricoles garantis. Le salaire minimum interprofessionnel garanti (SMIG) des salariés du secteur formel urbain est fixé à 209,10 FCFA par heure, soit un montant mensuel de 48000 FCFA. Le salaire minimum agricole garanti (SMAG) pour les travailleurs relevant des entreprises agricoles est de 182,95 FCFA par heure, soit un montant mensuel de 42000 FCFA.

La prise en compte de nouveaux statuts, acteurs ou secteurs spécifiques du marché du travail sénégalais

Dans cette dernière partie, nous proposons de détailler des spécificités qui doivent être pris en compte pour caractériser le marché du travail sénégalais :

- la segmentation entre le milieu rural et le milieu urbain
- la segmentation entre les secteurs urbains formel et informel
- l'émigration des travailleurs

La segmentation entre les zones rurales et urbaines

Une forte disparité entre ces deux zones D'après le rapport de la banque mondiale (Banque Mondiale, 2007), l'emploi dans le milieu rural compte pour environ 59% des personnes qui travaillent au Sénégal. Dans le milieu rural, "les travailleurs sont en activité plus longtemps que dans les villes. [...] L'on y constate que près d'un enfant sur 2 a déjà rejoint le marché

du travail avant l'âge de 15 ans et que près de 9 aînés de plus de 64 ans sur 10 continuent à travailler". L'emploi se concentre dans des exploitations agricoles de petite taille de type familiale ou individuelle. Le taux d'activité y est plus élevé que dans la ville car la plupart des individus sont sollicités pour le travail agricole et il n'y a aucune couverture sociale pour les individus qui ne travaillent pas. D'après ce même rapport, un quart des travailleurs seulement estiment avoir une activité permanente à temps plein. La majorité du travail s'effectue de façon informelle. Les travailleurs du milieu rural sont très peu qualifiés dans l'ensemble ; "7 personnes (âgées de plus de 15 ans) sur 10 ne savent pas encore lire en milieu rural, dont pratiquement 9 femmes sur 10" (Banque Mondiale, 2007).

Dans le milieu urbain, il existe une plus grande diversification des occupations avec les activités du secteur secondaire et du secteur tertiaire. D'après (Banque Mondiale, 2007), "les qualifications reportées sont en général supérieures, surtout dans le secteur de l'industrie et dans l'administration publique qui regroupent une large proportion de travailleurs avec une éducation secondaire et supérieure. Cette plus grande diversification et qualification se traduisent par une plus grande sécurité de l'emploi puisque les emplois permanents à temps plein représentent autour de 60% des postes de travail".

Les taux d'activité dans les villes sont moins élevés que dans les campagnes et le taux de chômage y est plus élevé. D'après les données de l'ESPS-II (ESP, 2011), les taux de chômage et d'activité dans le milieu rural et le milieu urbain sont les suivants :

	taux de chômage	taux d'activité
Dakar-urbain	14,1%	45,1%
Autres urbains	13,9%	40,2%
Zones rurales	7,4%	54,2%

Modéliser ces deux milieux Les caractéristiques de l'emploi sont donc très différentes entre le milieu rural et le milieu urbain. Il paraît donc impossible de modéliser l'emploi au Sénégal avec un seul marché du travail homogène. Deux possibilités d'extension de WorkSim pour modéliser le milieu rural et le milieu urbain pourraient être mises en œuvre :

- La première serait de considérer uniquement le marché du travail urbain, et de modéliser le milieu rural de façon exogène, de façon à simplement reproduire les flux de migration du milieu rural vers le milieu urbain, de la même manière que l'on modélise les flux de sorties des études des étudiants dans le modèle WorkSim.
- La deuxième serait de construire un couplage de deux modèles du marché du travail, l'un modélisant le marché du travail rural et l'autre le marché urbain. Le passage d'un milieu à l'autre pourrait être modélisé par un flux de migration endogène au modèle. Cette décision endogène des agents pourra s'appuyer sur une fonction de type "Harris-Todaro" (Harris et Todaro, 1970) qui suppose que la migration est une réponse au différentiel de salaire attendu entre la ville et la campagne. Ainsi, de la même façon

qu'un individu dans l'état inactif dans WorkSim choisit de chercher un emploi si l'utilité espérée des emplois nouveaux prospectés est supérieure à son utilité d'être inactif multiplié par un facteur de coût psychologique face au changement, un individu du milieu rural pourrait décider de migrer vers la ville si l'utilité espérée dans la ville dépasse son utilité de son emploi à la campagne multipliée par un facteur qui représente le coût psychologique et matériel de la migration.

Le secteur formel et le secteur informel dans les villes

La deuxième spécificité importante qu'il faut intégrer dans WorkSim est le découpage entre secteur formel et informel dans les villes.

Les différences entre le secteur formel et le secteur informel D'après (ESP, 2011), le secteur informel a un poids très important dans l'économie sénégalaise. Il représente 42,2% des travailleurs au Sénégal, tandis que les secteurs publics et privé formel représentent respectivement 4,7% et 8,2%. D'après (Banque Mondiale, 2007), "le travailleur typique dans le secteur informel est âgé de 28 ans, possède un niveau moyen d'études inférieur à 6 ans. Il est actif dans une micro-entreprise (de 2 à 10 personnes) ou une entreprise individuelle. [...] L'employé type du secteur formel a environ 39 ans, il a passé 11 années à l'école, est relativement qualifié et travaille dans une grande entreprise".

Néanmoins, il est important de préciser qu'il existe une forte substituabilité et de nombreux flux entre l'emploi formel et l'emploi informel. Ainsi dans les périodes de crise, quand les chômeurs sont incapables de trouver des emplois dans les entreprises formelles, ils se réfugient dans le secteur informel. Dans les périodes de reprise, les travailleurs du secteur informel cherchent par contre des emplois mieux rémunérés et plus protégés dans le secteur formel ou le secteur public. On parle alors d'un « marché dual » de l'emploi typique des pays en développement.

Modélisation distincte secteur formel et informel Les secteurs formel et informel sont étroitement imbriqués. Les mêmes individus peuvent passer de l'un à l'autre plusieurs fois au cours de leur carrière. Il semble donc difficile de modéliser séparément ces deux secteurs comme il pourrait l'être fait pour le milieu rural et le milieu urbain (cf. section 7.4). Nous proposons de les modéliser dans un cadre unique avec les décisions des agents en rationalité limitée de passer d'un secteur à un autre.

La modélisation des décisions des entrepreneurs de passer d'un secteur à l'autre devrait résulter d'un arbitrage en terme de coût-bénéfice. Pour une entreprise, les avantages du secteur informel sont de ne pas payer de charges, de pouvoir payer les employés en dessous du salaire minimum et de s'affranchir de toutes les contraintes légales pour se séparer des salariés en cas de baisse de la demande. D'un autre côté, entrer dans le secteur formel permet d'accéder aux commandes publiques. Il permet d'accéder aussi à des sources de financements plus importantes via des crédits de l'État ou des banques commerciales (OHADA, 2010). Enfin entrer dans la légalité permet au dirigeant d'entreprise ainsi qu'à ses employés de bénéficier

d'une couverture sociale, ce qui permet notamment d'attirer les employés les plus qualifiés du marché du travail.

La modélisation du choix des entreprises entre le secteur formel et informel nécessite de prendre en compte ces éléments et dépasse pour l'instant le cadre de WorkSim.

Dans un premier temps pour intégrer ces deux secteurs dans WorkSim, il pourrait être fixé de manière exogène une fraction *partSecteurInformel* des entreprises sénégalaises qui font partie de ce secteur. Cette modélisation est similaire à celle de la modélisation exogène des entreprises pouvant recruter en CDD d'usage dans WorkSim.

Une embauche sans contrat dans le secteur informel pourrait être modélisée dans WorkSim comme un CDD d'usage d'une semaine (plus petite unité de temps dans WorkSim), sans aucune charge sociale, sans contraintes de renouvellement ni de salaire minimum.

Par ailleurs, d'après (Banque Mondiale, 2007), les productivités des emplois informels sont beaucoup plus faibles que celles des emplois du secteur formel. Ainsi, les niveaux de productivités horaires de bases QH^{base} (et donc les salaires de base) des postes des emplois du secteur informel doivent être calibrés à des valeurs inférieures de celles des emplois du secteur formel.

Du côté des individus, ces emplois du secteur informel n'offrent pas de stabilité et le salaire est plus bas, donc ces emplois seront évalués avec la plus petite utilité. Les individus étant en compétition dans le modèle pour les offres d'emploi les plus attractives, les individus plus âgés et avec plus de capital humain auront plus de chance d'être embauchés dans le secteur formel que dans le secteur informel. Dans le modèle, les emplois du secteur informel reviendront donc aux moins qualifiés et aux nouveaux entrants sur le marché du travail. Des transitions restent néanmoins possibles dans le modèle, car des agents en emploi dans le secteur informel peuvent continuer à chercher un emploi dans le secteur formel (dans l'état de PARAE dans le modèle).

L'émigration

D'après (Banque Mondiale, 2007), l'émigration et notamment la "fuite des cerveaux" est un phénomène important au Sénégal. D'après (Docquier et Marfouk, 2004) cités par ce même rapport, il y a un nombre élevé d'immigrants qui quittent le Sénégal chaque année. Ce phénomène de fuite des cerveaux jouent un rôle majeur dans le manque de croissance de la productivité du travail au Sénégal.

La modélisation endogène de ce flux d'émigration dépasse le cadre de WorkSim, car il faudrait un modèle du marché du travail multi-pays tenant compte des décisions de migration internationales. Pour commencer le flux d'émigration de travailleurs pourrait être modélisé de façon exogène.

Bilan

Pour résumer, nous proposons de caractériser le marché du travail sénégalais avec un diagramme de flux qui reprend les différentes suggestions de modélisation proposées dans les parties précédentes. Dans ce diagramme les nouvelles propositions pour adapter WorkSim au Sénégal sont en vert avec :

- la modélisation en "boîte noire" du milieu rural avec un flux de migration interne vers le marché du travail de la ville (cf. section 7.4)
- les deux nouveaux états de PAE et PARAE du secteur informel (cf. section 7.4)
- le flux exogène d'émigration (cf. section 7.4)

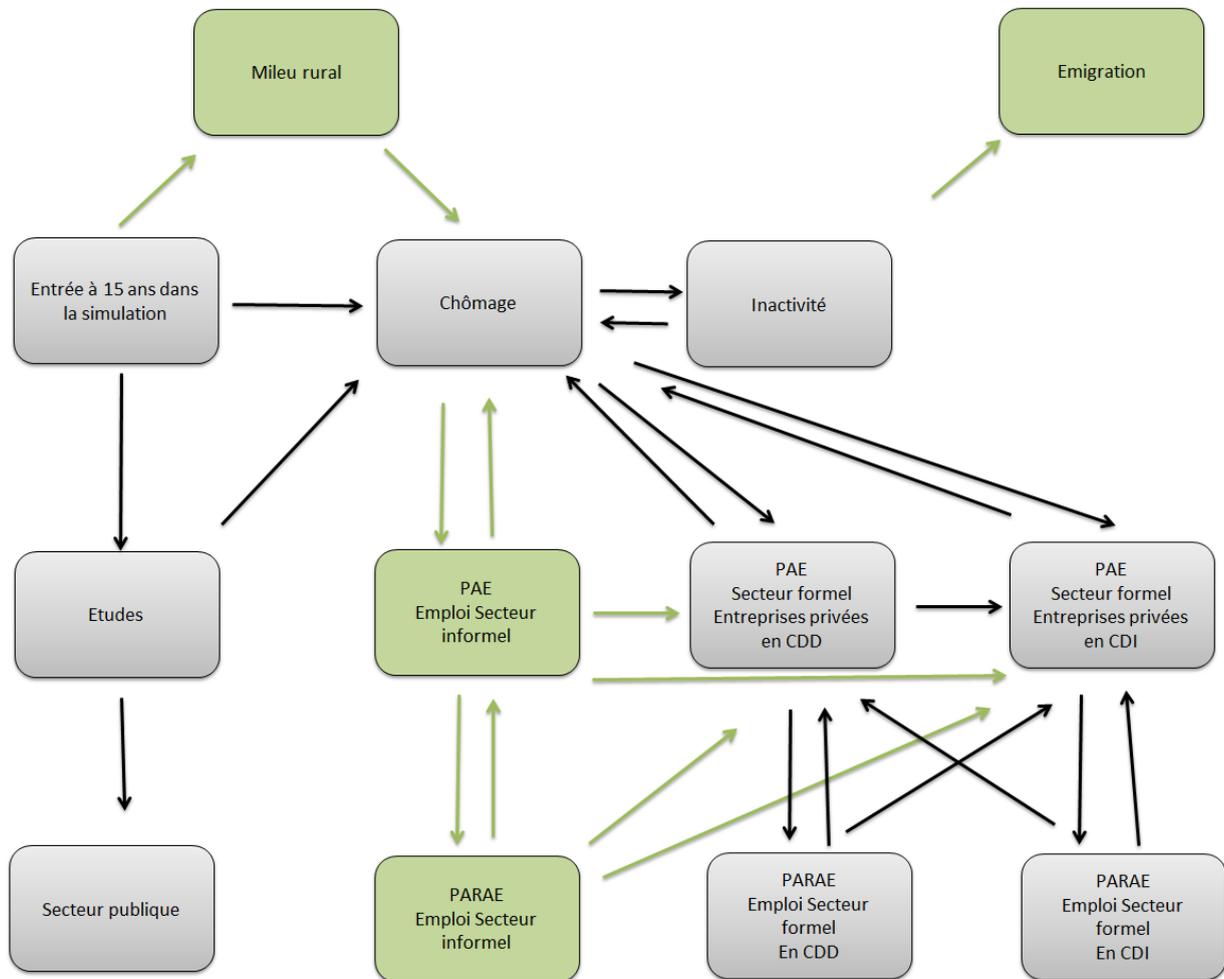


FIGURE 7 – Diagramme de flux du marché du travail Sénégalais

Par ailleurs, des éléments qui n'existent pas dans WorkSim pourraient être ajoutés pour la modélisation du marché du travail sénégalais comme l'influence des réseaux sociaux. Cette dimension est importante au Sénégal plus encore qu'en France. D'après (Camara et Gueye, 2013), "l'accès à l'emploi urbain dans les pays en développement passe par l'appartenance des individus à des réseaux qui facilitent leur insertion professionnelle à travers des recommandations. Les relations de parenté, d'amitié, les réseaux ethniques et religieux sont plus importants dans le processus de recherche d'emploi". Les discriminations constituent une autre dimension importante sur le marché du travail sénégalais. En effet, d'après cette même étude, les femmes sont désavantagées dans tous les secteurs avec une discrimination plus élevée dans le secteur privé formel.

Glossaire

Agent On appelle agent une entité physique ou virtuelle (Ferber, 1999) :

qui est capable d'agir dans un environnement ; qui peut communiquer directement avec d'autres agents ; qui est mue par un ensemble de tendances (sous forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser) ; qui possède des ressources propres ; qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement ; qui ne dispose que d'une représentation partielle de cet environnement (et éventuellement aucune) ; qui possède des compétences et offre des services ; qui peut éventuellement se reproduire ; dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Agent-based computational economics (ACE) Domaine de l'économie computationnelle qui étudie les processus économique vues comme des systèmes dynamiques complexe avec des agents virtuels en interaction.

Agent représentatif Dans la théorie économique, on parle d'agent représentatif pour désigner l'entreprise ou le consommateur de base, dont le comportement est représentatif de la grande majorité des entreprises ou des consommateurs. (alt, 2010)

Aménité Le niveau d'aménité des postes de l'entreprise regroupe l'ensemble des caractéristiques non monétaires de l'emploi (reconnaissance sociale, ambiance de travail dans l'entreprise, etc.). Avec le salaire et le temps de travail, c'est un facteur que les individus du modèle vont prendre en compte pour évaluer l'utilité d'un poste.

Ancienneté moyenne au chômage Moyenne du temps passé par les chômeurs depuis qu'ils sont au chômage

Capital humain D'après (Généreux, 2001), le capital humain est l'ensemble des aptitudes, talents, qualifications, expériences accumulés par un individu et qui déterminent en partie sa capacité à travailler ou à produire pour lui-même ou pour les autres.

Cohortes D'après (Wikipédia, 2014), en analyse de données, la cohorte résulte d'un processus de segmentation qui permet d'étudier dans le temps le comportement d'une population ayant pour point commun un événement précis (agi ou subi) sur une même période. Une

fois la période et l'évènement déterminés, on pourra étudier cette cohorte sur toute période (antérieure comme postérieure à cet évènement) pour découvrir les corrélations, points de convergence et points de différenciation

Chômage conjoncturel (alt, 2010) Se dit du chômage transitoire, lié au fait que le rythme de croissance de l'activité a tendance à fluctuer et que cette fluctuation engendre un chômage destiné à se résorber lorsque le cycle d'activité recommence à s'accélérer. Par définition, le chômage conjoncturel est transitoire.

Chômeur (BIT) En application de la définition internationale adoptée en 1982 par le Bureau international du travail (BIT), un chômeur est une personne en âge de travailler (15 ans ou plus) qui répond simultanément à trois conditions :

- être sans emploi, c'est à dire ne pas avoir travaillé au moins une heure durant une semaine de référence ; - être disponible pour prendre un emploi dans les 15 jours ; - avoir cherché activement un emploi dans le mois précédent ou en avoir trouvé un qui commence dans moins de trois mois

Durée moyenne des épisodes de chômage Durée moyenne des épisodes de chômage terminés pendant l'année pour l'ensemble de la population en âge de travailler

Endogène Une variable est endogène dans un modèle économique, lorsque ses valeurs sont déterminées par le modèle lui-même, par exemple par les décisions économiques des acteurs, ou l'influence d'autres variables économiques. Une variable endogène est à la fois explicative et expliquée.

Effet d'aubaine Lorsqu'un acteur économique s'efforce d'inciter les autres acteurs à agir de telle manière, il les appâte en général en leur offrant un avantage s'ils se comportent de la façon souhaitée : par exemple baisse de prix, prime, cadeau, etc. Il y a effet d'aubaine si l'acteur qui bénéficie de cet avantage avait eu, de toute façon, l'intention d'agir ainsi même si l'avantage n'avait pas été accordé. (alt, 2010)

Effet d'éviction effet indirects et en général négatifs d'une politique de l'emploi qui concernent les personnes qui ne sont pas bénéficiaires du dispositif.

Emploi (BIT) Les personnes employées au sens du BIT sont celles ayant travaillé pendant une durée quelconque, ne serait-ce qu'une heure, au cours d'une semaine dite de référence. Cette notion est différente de celle de l'emploi au sens du recensement de la population qui elle, concerne les personnes ayant déclaré avoir un emploi dans le formulaire du recensement. La notion d'emploi au sens du BIT est donc plus extensive que celle au sens du recensement de la population. Certaines personnes peuvent, en effet, ne pas considérer que des emplois occasionnels méritent déclaration au recensement. La mesure de l'emploi au sens du BIT ne peut être faite que par des questions précises, telles celles de l'enquête Emploi, dont un des objectifs principaux est précisément cette mesure.

Exogène Une variable est exogène dans un modèle économique lorsque ses valeurs sont tirées de l'observation, ou résultent d'hypothèses spéciales, non économiques. Une variable exogène est explicative, mais non expliquée par le modèle.

Flexisécurité Il est composé des mots flexibilité et sécurité. Le terme flexisécurité désigne un système d'organisation du marché du travail qui cherche à concilier une plus grande flexibilité au niveau de la main-d'œuvre pour les entreprises et, en contrepartie, une plus grande sécurité ou protection de l'emploi pour les salariés.

Inactif On définit conventionnellement les inactifs comme les personnes qui ne sont ni en emploi (BIT) ni au chômage : jeunes de moins de 15 ans , étudiants, retraités, hommes et femmes au foyer, personnes en incapacité de travailler,...

Ménage De manière générale, un ménage, au sens statistique du terme, désigne l'ensemble des occupants d'un même logement sans que ces personnes soient nécessairement unies par des liens de parenté (en cas de cohabitation, par exemple). Un ménage peut être composé d'une seule personne.

Modèle cognitif Un modèle cognitif est une représentation simplifiée visant à modéliser des processus psychologiques ou intellectuels. Leur champ d'application est principalement la psychologie cognitive et l'intelligence artificielle à travers la notion d'agent.

Rationalité limitée La rationalité limitée est un concept utilisé en sociologie et en micro-économie. Il porte sur l'étude du comportement d'un individu (ici appelé acteur) face à un choix (l'achat d'un produit,...). Il suppose que l'acteur économique a un comportement rationnel, mais que sa rationalité est limitée en termes de capacité cognitive et d'information disponible. Dès lors, l'acteur va généralement s'arrêter au premier choix qu'il jugera satisfaisant.

Salaires de réservation Le salaire de réserve, ou salaire de réservation est, selon des économistes néo-classiques, le salaire en deçà duquel un chômeur n'accepte pas de la demande de travail (ou offre d'emplois) correspondante. Il peut être défini comme "le salaire pour lequel il serait indifférent aux travailleurs de continuer de chercher un emploi mieux payé ou d'accepter l'emploi qui leur est proposé

Salaires Équivalent Temps Plein (EQTP) Le salaire moyen en équivalent temps plein est calculé en prenant en compte tous les postes de travail des salariés (y compris les postes à temps partiel). Chaque poste de travail est pris en compte au prorata de son volume horaire de travail rapporté à celui d'un poste à temps complet. Par exemple, un poste à mi-temps durant 12 mois pour un salaire total de 10 000 euros compte pour 0,5 « année- travail » rémunérée 5 000 euros. Le même poste d'une durée de 6 mois aura un poids de 0,25 rémunéré 2 500 euros. (INSEE, 2011i)

Système Multi-Agent En informatique, un Système Multi-Agents (SMA) est un système composé d'un ensemble d'agents, situés dans un certain environnement et interagissant selon certaines relations. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu'elle est, au moins partiellement, autonome. Ce peut être un processus, un robot, un être humain, etc.

Taux d'activité Le taux d'activité est le rapport entre le nombre d'actifs (actifs occupés et chômeurs) et l'ensemble de la population correspondante.

Taux de chômage Le taux de chômage est le pourcentage de chômeurs dans la population active (actifs occupés + chômeurs). On peut calculer un taux de chômage par âge en mettant en rapport les chômeurs d'une classe d'âge avec les actifs de cette classe d'âge. De la même manière se calculent des taux de chômage par sexe, par PCS, par région, par nationalité, par niveau de diplôme...

Taux d'entrée cf. Taux de rotation

Taux d'emploi Le taux d'emploi d'une classe d'individus est calculé en rapportant le nombre d'individus de la classe ayant un emploi au nombre total d'individus dans la classe. Il peut être calculé sur l'ensemble de la population d'un pays, mais on se limite le plus souvent à la population en âge de travailler (généralement définie, en comparaison internationale, comme les personnes âgées de 15 à 64 ans), ou à une sous-catégorie de la population en âge de travailler (femmes de 25 à 29 ans par exemple).

Taux de rotation (ou turn-over) d'après (DARES, 2012), le taux de rotation est la moyenne des taux d'entrée et de sortie. Depuis la publication du 1er semestre 2009, les taux d'entrée et de sortie sont calculés hors transferts entre établissements d'une même entreprise. Pour une période donnée, le taux d'entrée (respectivement de sortie) est le rapport entre le nombre total d'entrées (respectivement de sorties) de la période et l'effectif moyen sur la période.

Les entrées comprennent les embauches en contrat à durée déterminée et en contrat à durée indéterminée. Les CDD comprennent les contrats en alternance et les contrats aidés, à la différence d'autres sources comme l'enquête Emploi de l'Insee. Les sorties comprennent les fins de CDD, les démissions, les licenciements économiques et pour motif personnel, les départs à la retraite, les fins de période d'essai, les ruptures conventionnelles et d'autres motifs (accidents, décès, non déclaration,...).

Taux de sortie cf. Taux de rotation

Tension sur le marché du travail La tension sur le marché du travail est définie comme le rapport entre le nombre de postes vacants du niveau de qualification divisé par le nombre de chômeurs

Utilité Mesure de la satisfaction d'un individu du compte tenu de ses préférences.