CEA | CENTRE D'ÉTUDES ACTUARIELLES

L'ORSA : Apport de la logique floue dans la modélisation des management actions en non-vie

Mémoire présenté en vue de la validation du cursus à la
Formation d'Actuaire du Centre d'Études Actuarielles et l'admission à
l'Institut des Actuaires

par

Cynthia BAZOGE & Alexandre DIAS LOPES

Avril 2017

Résumé

Mots-clés : Solvabilité II, ORSA, gestion des risques, logique floue, fonction d'appartenance, matrice de décision, management action, modélisation stochastique, assurance non-vie, revalorisation tarifaire, besoin global de solvabilité

La directive européenne Solvabilité II est entrée en vigueur le 1er janvier 2016. Elle vise à améliorer la solvabilité et la gestion des risques des assureurs et des réassureurs européens. La notion d'ORSA y est introduite, « *Own Risk and Solvency Assessment* », un processus d'évaluation interne des risques et de la solvabilité de l'entreprise. L'ORSA demande une évaluation du besoin global de solvabilité compte tenu des risques spécifiques auxquels est exposée l'entreprise et de son profil de risque. L'ORSA permet de faire le lien entre les objectifs stratégiques et le besoin de solvabilité sur une vision plus long terme. L'intégration des management actions est donc un élément essentiel. Cela permet de modéliser au plus juste l'évolution future du profil de risque de l'assureur et son adaptation aux nouvelles conditions de marché telle que définie au travers de la politique de gestion des risques.

Dans le cadre d'un exercice ORSA et pour l'évaluation du besoin global de solvabilité, ce mémoire s'interroge sur la pertinence de modéliser les management actions à l'aide de la logique floue, dans un modèle stochastique. L'intérêt de la logique floue dans le domaine de l'actuariat est discuté, afin d'en tirer des conclusions quant à la pertinence de son utilisation dans le domaine de la gestion des risques et de la mise en place de l'ORSA.

La logique floue propose un environnement mathématique complet, qui permet d'intégrer des données imparfaites dans un processus de décision. Elle offre un cadre pour modéliser la représentation humaine des connaissances. La logique floue s'inspirant du raisonnement humain, les variables du modèle ne peuvent donc pas être représentées par les simples variables booléennes 0 et 1. Elle consiste ainsi à remplacer les algorithmes de réglage conventionnels utilisés jusqu'alors par des règles linguistiques.

Une application est réalisée sur le portefeuille d'un assureur automobile. Il ressort de notre modèle stochastique que la modélisation, à l'aide de la logique floue, de la politique tarifaire de l'assureur en fonction de l'environnement économique permet d'améliorer sensiblement les indicateurs implémentés grâce à un résultat technique plus cohérent et meilleur. Ce constat ne peut cependant pas être généralisé à plus grande échelle, il convient à chaque entreprise d'effectuer cette démarche afin d'en déduire si son besoin en capital peut ou non être revu à la baisse grâce à logique floue.

Abstract

Keywords: Solvency II, ORSA, risk management, fuzzy logic, membership function, decision matrix, management action, stochastic modeling, non-life insurance, tariff revaluation, overall solvency needs

The European Solvency II Directive came into force on 1 January 2016. It aims to improve the solvency and risk management of European insurers and reinsurers. The concept of ORSA is introduced, "Own Risk and Solvency Assessment", an internal risk assessment and solvency assessment process. ORSA requests an assessment of the overall solvency needs taking into account the specific risks faced by the company and its risk profile. ORSA provides a link between strategic goals and the overall solvency needs over a long-term vision. The integration of management actions is therefore an essential element. It allows modeling fairly the future evolution of the insurer's risk profile and its adaptation to the new market conditions as defined by the risk management policy.

As part of an ORSA exercise and for assessment of the overall solvency needs, this thesis considers the relevance of modeling management actions using fuzzy logic. The interest of fuzzy logic in the actuarial field is discussed in order to draw conclusions about the relevance of its use in the field of risk management and the implementation of ORSA.

The fuzzy logic offers a complete mathematical environment, which allows integrating imperfect data in a decision-making process. Fuzzy logic provides a framework for modeling human representation of knowledge. Since fuzzy logic is inspired by human reason, variables of the model cannot be represented by the simple Boolean variables 0 and 1. It consists in replacing the conventional adjustment algorithms used by language rules.

An application is carried out on the portfolio of an automobile insurer. It appears from our stochastic model that the modeling using fuzzy logic of the insurer's pricing policy according to the economic environment allows to improve significantly results of the model thanks to a more coherent and better technical result. However, this observation cannot be widespread on a larger scale, it is appropriate for each company to carry out this procedure in order to deduce whether its overall capital needs may or may not be revised downwards through fuzzy logic.

Table des matières

RÉSUMÉ **3**

ABSTRACT **4**

INTRODUCTION **8**

PARTIE 1 : L'ORSA ET LA GESTION DES RISQUES AU CENTRE DES PRÉOCCUPATIONS DE SOLVABILITÉ II **10**

Chapitre 1 : La définition réglementaire de l'ORSA **12**
1. La directive Solvabilité II, une réforme du monde européen de l'assurance 12
2. Le long chemin de la directive Solvabilité II avant son entrée en vigueur 14
3. La définition de l'ORSA dans Solvabilité II et les précisions des différents acteurs 15

Chapitre 2 : L'ORSA, une prise en compte de la gestion des risques dans les objectifs stratégiques **22**
1. L'ORSA, partie intégrante du système de gestion des risques 22
2. Mise en œuvre de l'ORSA 25
3. Appropriation de la culture des risques chez les assureurs avec l'ORSA 28

Chapitre 3 : Les management actions, un élément essentiel de la modélisation ORSA **30**
1. La définition du management action 30
2. Le rôle des management actions dans l'ORSA 30
3. La mise en place des management actions dans l'ORSA 31

PARTIE 2 : LA LOGIQUE FLOUE, UN CONCEPT ADAPTÉ AUX EXIGENCES DE SOLVABILITÉ II **33**

Chapitre 1 : Introduction à la logique floue **34**
1. Un peu d'histoire 34
2. Le concept général de la logique floue 35
3. La théorie des sous-ensembles flous 36
4. Le raisonnement approximatif 46

Chapitre 2 : La commande floue **48**
1. La première étape : la fuzzification 48
2. La deuxième étape : le mécanisme d'inférence 51
3. La troisième étape : la défuzzification 53
4. Conclusion 55

Chapitre 3 : L'apport de la logique floue à la gestion des risques et à l'ORSA **57**

PARTIE 3 : LE MODÈLE D'ÉVALUATION PROSPECTIVE D'UNE ENTREPRISE NON-VIE DANS LE CADRE DE L'ORSA **59**

Chapitre 1 : Le périmètre de modélisation **60**

1. Le choix des risques à modéliser 60
2. Le choix de l'horizon de projection et de la mesure de risque 61
3. Le choix de la structure 61
4. Le fonctionnement des projections 62

Chapitre 2 : La modélisation de l'actif 64
1. Les données en entrée 64
2. La génération de scénarios économiques 64
3. La projection du portefeuille d'actifs 65
4. Les données en sortie 66

Chapitre 3 : La modélisation du passif 67
1. Les données en entrée 67
2. La projection des éléments du passif 67

Chapitre 4 : La modélisation des interactions entre l'actif et le passif 73
1. La valeur de l'actif en regard du passif 73
2. La production des résultats 75

PARTIE 4 : LA MODÉLISATION DU MANAGEMENT ACTION DE REVALORISATION TARIFAIRE 77

Chapitre 1 : Les limites du management action de revalorisation tarifaire 78
1. Les conséquences d'une revalorisation tarifaire en non-vie 78
2. L'incidence du taux de revalorisation sur la croissance du portefeuille 79

Chapitre 2 : La modélisation en logique floue 80
1. La fuzzification de la politique tarifaire 80
2. Le mécanisme d'inférence 84
3. La défuzzification 87
4. Ensemble des décisions obtenu en logique floue 89

Chapitre 3 : La modélisation en logique classique 90
1. La définition des différentes classes d'appartenance 90
2. La définition de la matrice de décisions 91
3. L'ensemble des décisions obtenu en logique classique 92

Chapitre 4 : La comparaison des deux implémentations 93
1. La comparaison de l'ensemble des décisions entre les deux logiques 93
2. La comparaison de l'ensemble des décisions sur la tranche 140-155% de taux de couverture du SCR .. 95
3. La comparaison de l'ensemble des décisions sur la tranche 190-220% de taux de couverture du SCR .. 96

PARTIE 5 : ANALYSE DES RÉSULTATS DU MODÈLE ET DE L'APPORT DE LA LOGIQUE FLOUE 99

Chapitre 1 : Les données de projection du modèle 100
1. L'origine des données et la qualité des données 100
2. Les données de l'actif 100
3. Les données du passif 101

Chapitre 2 : La situation initiale de l'assureur 106

Chapitre 3 : La situation à l'horizon de projection dans le scénario central 107
1. L'évolution du résultat en scénario central 109
2. L'évolution de l'actif et du passif en scénario central 110
3. L'évolution du taux de couverture en scénario central 111
4. La détermination du besoin global de solvabilité en scénario central 113

Chapitre 4 : Les bénéfices du management action de revalorisation tarifaire 114
1. L'évolution du ratio combiné et du résultat moyen en scénario classique 114
2. L'évolution du taux de couverture en scénario classique 118
3. La détermination du besoin global de solvabilité en scénario classique 120

Chapitre 5 : Les bénéfices de la modélisation du management action en logique floue 122
1. L'évolution du ratio combiné et du résultat moyen en scénario flou 122
2. L'évolution du taux de couverture en scénario flou 127
3. La détermination du besoin global de solvabilité en scénario flou 129
4. L'impact de la logique floue sur les simulations extrêmes 130

CONCLUSION 136

BIBLIOGRAPHIE 139
1. L'ORSA et la gestion des risques 139
2. La Logique floue 140

TABLE DES ILLUSTRATIONS 142

Introduction

Un assureur se doit d'évaluer au plus juste ses activités, afin de disposer d'indicateurs fiables et utiles au pilotage de la gestion, que ce soit en termes de compétitivité, de rentabilité ou bien encore de solvabilité. Pour ce faire, il est essentiel d'apprécier au mieux la réalité économique des engagements ainsi que les risques auxquels est exposée l'entreprise. C'est d'ailleurs dans cette optique que s'est transformé le référentiel réglementaire.

Certaines évolutions au niveau économique telles que les exigences des actionnaires, la concurrence entre secteurs, ou encore l'apparition de nouveaux risques (le terrorisme, ou les catastrophes naturelles) ont induit une remise en question du système de solvabilité utilisé jusqu'il y a peu. De plus, les avancées techniques en informatique, en analyse de risques, ou en finance ont permis de se tourner vers un système de solvabilité plus complexe.

Avec l'entrée en vigueur du nouveau régime prudentiel Solvabilité II le 1er janvier 2016, les compagnies d'assurance se doivent d'introduire de nouvelles normes d'évaluation dans leur bilan et de mettre en place de nouvelles exigences en terme de capital de solvabilité. La réforme Solvabilité II complète ces mesures par des exigences qualitatives en termes de gouvernance et de gestion des risques. Cela passe par le développement d'un modèle ORSA (*Own Risk and Solvency Assessment*), qui permet aux assureurs d'évaluer et de mesurer leurs propres risques. Il s'agit d'un outil de pilotage et d'aide à la décision que chaque entreprise d'assurance doit utiliser pour évaluer au mieux ses risques, qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs.

Dans l'environnement concurrentiel du secteur de l'assurance française, les assureurs non-vie doivent faire face à un marché particulièrement tendu et mature, et à une réglementation en constante évolution. Dans un objectif de protection des assurés, depuis 2015, il est par exemple plus facile de résilier son contrat d'assurance grâce à la loi sur la consommation dite loi Hamon. Cette loi allège les conditions de résiliation des assurés. Elle leur permet de faire jouer la concurrence afin de faire baisser les prix de leur contrat d'assurance. Il est donc d'autant plus important pour les assureurs non-vie de gérer finement les risques auxquels ils doivent faire face.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la réflexion autour de ce mémoire, l'objectif étant de répondre à la problématique d'évaluation au plus juste du besoin global de solvabilité demandé dans le cadre de l'ORSA, pour un assureur non-vie. L'ORSA nécessite l'utilisation de management actions qui permettent de projeter les résultats de l'entreprise sur un horizon lointain, tout en prenant en compte les décisions que le top management pourrait prendre en fonction de la situation économique de sa compagnie. Mais comment modéliser ces management actions finement, afin de retranscrire précisément les actions futures du top management ?

Les méthodes de modélisation les plus couramment choisies utilisent une logique binaire qui présente certaines limites. Les valeurs sont bornées à des classes et aucune nuance n'est apportée dans la décision prise.

Une solution envisagée est l'utilisation d'une toute autre approche : la logique floue. Il s'agit d'un environnement mathématique complet, qui permet d'intégrer des données imparfaites ou qualitatives dans un processus de décision. Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif principal va donc

être de proposer une alternative à la modélisation de management actions avec une logique binaire, par l'utilisation d'une technique de logique floue. Le but final est de discuter de l'apport de cette nouvelle approche, tout en ayant comme ambition secondaire de présenter de façon accessible l'ensemble des outils mathématiques qui constituent la logique floue.

Nous allons tout d'abord revenir plus en détails, dans la première partie de ce mémoire, sur la définition réglementaire de l'ORSA, sur la prise en compte de la gestion des risques dans les objectifs stratégiques d'une compagnie et sur les management actions qui sont un élément essentiel de la modélisation ORSA.

Dans un second temps, seront présentées en détails les notions essentielles définissant la logique floue, avant d'en exposer sa principale application, à savoir la commande floue.

Nous détaillerons ensuite, dans la troisième partie, la modélisation prospective réalisée pour une entreprise non-vie qui possède un portefeuille d'assurance automobile. Le modèle stochastique projettera le portefeuille d'actifs, les éléments du passif ainsi que les interactions entre l'actif et le passif.

Puis, nous aborderons la modélisation d'un management action, celui de la revalorisation tarifaire, d'une part à l'aide de la commande floue puis d'autre part en logique classique. Nous pourrons ainsi comparer ces deux implémentations.

Nous analyserons enfin dans la dernière partie, les résultats de ces deux modélisations afin d'en dégager les bénéfices du management action de revalorisation tarifaire ainsi que ceux de l'utilisation de la logique floue.

Nous pourrons ainsi conclure et répondre à la problématique de ce mémoire : « **Que peut apporter la logique floue dans la modélisation des management actions à un modèle ORSA en non-vie ?** ».

Partie 1 : L'ORSA et la gestion des risques au centre des préoccupations de Solvabilité II

La directive européenne Solvabilité II est entrée en vigueur le 1er janvier 2016. Elle vise à améliorer la solvabilité et la gestion des risques des assureurs et des réassureurs européens.

Une exigence réglementaire de solvabilité est imposée aux entreprises afin d'être solvables dans 99,5% des cas. Ce montant est calculé à partir de la formule standard ou à partir d'un modèle interne. Construire un modèle interne n'est pas neutre pour un assureur et implique un coût humain et financier non négligeable. La formule standard a, quant à elle, essuyé des critiques sur ses hypothèses et sa calibration.

Certaines hypothèses sous-jacentes de la formule standard sont très restrictives ou très fortes et ne sont pas vérifiées pour chaque assureur. Le calibrage de la formule standard a été un long processus qui a nécessité la consultation des acteurs du marché à de nombreuses reprises. Les calibrages ont été source de débats controversés. Certains n'apportaient pas les effets escomptés et ont d'ailleurs été jugés contre-productifs par les assureurs. Beaucoup d'intervenants reprochent à la formule standard sa trop grande homogénéité induite par la volonté de pouvoir s'appliquer à tous les assureurs européens. De la sorte, la calibration est trop générale et ne s'adapte pas aux caractéristiques de chaque assureur.

Même si le modèle interne est plus à même de répondre aux profils plus spécifiques des assureurs, le calcul de l'exigence de capital permettant d'être solvable dans 99,5% des cas retient un horizon de projection d'un an. Cette solution peut être mal adaptée à la politique de gestion des risques de l'assureur, et plus particulièrement pour les branches longues.

Bien que l'exigence réglementaire de solvabilité calculée à l'aide de la formule standard ou du modèle interne présente de nombreuses limites, elle est essentielle et doit être respectée à tout moment. Le législateur a néanmoins complété la directive avec un volet sur la gestion des risques. Cette partie de la directive introduit la notion d'ORSA, « *Own Risk and Solvency Assessment* », un processus d'évaluation interne des risques et de la solvabilité de l'entreprise.

Le système de gouvernance et de gestion des risques exigé par la directive Solvabilité II gomme certaines limites de l'exigence réglementaire de solvabilité. Dans le cadre de la gestion des risques et de l'ORSA, la directive permet aux assureurs de prendre en compte des risques non considérés dans le calcul de solvabilité, car trop complexes ou impossibles à quantifier. L'ORSA demande une évaluation du besoin global de solvabilité compte tenu des risques spécifiques auxquels est exposée l'entreprise et de son profil de risque. Le capital évalué dans le cadre de l'ORSA tient alors compte des objectifs stratégiques de l'entreprise et des risques auxquels elle est exposée. L'ORSA permet de faire le lien entre les objectifs stratégiques et le besoin de solvabilité sur une vision à plus long terme. Il impose également l'évaluation du degré avec lequel le profil de risque d'un assureur ou d'un réassureur s'écarte des hypothèses qui sous-tendent le calcul de l'exigence de capital. L'ORSA exige des assureurs de ne pas se contenter de calculer son capital réglementaire mais de s'assurer que la formule standard est appropriée pour l'organisme et son profil de risque.

L'ORSA se concrétise par la réalisation d'un rapport (rapport ORSA) qui permet à l'assureur d'exposer ses observations à l'ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution). Au travers de ce rapport, l'assureur se prononce sur sa politique de gestion des risques et sur sa vision personnelle de sa solvabilité.

La volonté du Parlement Européen à travers cette directive est d'imposer un montant de fonds propres afin de couvrir les risques auxquels sont exposés les organismes d'assurance mais également de les sensibiliser à la gestion des risques. La gestion des risques et son assimilation par les acteurs du marché sont la clé de la réussite de la réforme. Les organismes doivent s'approprier ce nouveau dispositif à mettre en place afin que la gestion des risques prenne une place entière au sein de l'entreprise. En effet, l'application de la directive Solvabilité II, et plus particulièrement la mise en place du dispositif de gestion des risques et de l'ORSA, doit aider à promouvoir une culture forte de gestion du risque au sein des assureurs et réassureurs européens.

Nous allons dans cette partie définir l'ORSA et montrer en quoi il impose la prise en compte des objectifs stratégiques dans la politique de gestion des risques. Pour cela, nous allons nous baser sur la directive Solvabilité II et sur les publications de l'EIOPA (*European Insurance and Occupational Pensions Authority*), au travers des guidelines, et sur la gestion des risques. Nous allons également nous attarder sur les différentes publications réalisées notamment par l'ACPR et l'Institut des Actuaires.

Chapitre 1 : La définition réglementaire de l'ORSA

L'*Own Risk and Solvency Assessment* (ORSA) est un processus d'évaluation interne des risques et de la solvabilité de l'entreprise. Il est au cœur du système de gestion des risques mis en place au sein des sociétés et est incorporé en tant que tel dans les décisions stratégiques de l'entreprise. L'ORSA impose aux compagnies d'assurance et de réassurance de correctement évaluer leurs risques pour déterminer convenablement leur besoin global de solvabilité. Il est aussi un outil de supervision pour les autorités de contrôle, qui doivent être informées par l'entreprise des résultats produits par l'ORSA.

La notion nouvelle d'ORSA a été introduite dans la directive Solvabilité II votée en avril 2009. L'ORSA s'inscrit dans le Pilier 2 de Solvabilité II et est un élément majeur du système de gouvernance et de gestion des risques que les assureurs doivent mettre en place selon les exigences de la directive.

Par conséquent, afin de cerner les objectifs de l'ORSA, il est nécessaire de bien comprendre les exigences de la directive Solvabilité II et le concept de la gestion des risques pour les cas particuliers des compagnies d'assurance. C'est cette directive qui fixe le cadre réglementaire et les exigences auxquelles l'ORSA doit répondre.

1. La directive Solvabilité II, une réforme du monde européen de l'assurance

Solvabilité II est une directive de l'Union Européenne s'adressant aux assureurs et réassureurs européens depuis 2016. Elle définit de nouvelles exigences en fonds propres afin de mieux couvrir l'ensemble des risques encourus par les acteurs du marché assurantiel et d'harmoniser les pratiques au niveau européen.

Les premières normes de solvabilité ont été établies dans les années 70 pour constituer un référentiel réglementaire commun entre les pays européens. Ces normes ont été actualisées et aménagées en 2001 (Solvabilité I). Lors de la dernière crise boursière, les normes Solvabilité I se sont montrées plutôt efficaces. Le nombre de faillites d'assureur en Europe reste très faible et les entreprises demeurent solvables. Mais ce bilan positif peut s'expliquer par la conjoncture financière qui a généré de nombreux surplus (plus-values latentes comptables) dans les pays ayant opté pour une comptabilisation des actifs au coût historique sans revalorisation des passifs en fonction du niveau des taux.

La Commission Européenne a pointé certaines faiblesses du doigt à propos de ce système. La cause principale de faillite des assurances en Europe est la mauvaise gestion stratégique. Une décision inadéquate peut avoir de lourdes conséquences sur les finances d'un assureur. Ce paramètre n'était pas pris en charge par le système de surveillance précédent. Il n'était d'ailleurs pas assez adapté aux spécificités de chaque entreprise. Avec Solvabilité I, si une entreprise était détectée en situation de crise, il était souvent trop tard pour réagir. Le système posait également d'autres limites, notamment en regard de la concurrence bancaire qui, elle, avait revu son système de solvabilité par l'intermédiaire de Bâle II. De plus, l'application de Solvabilité I n'était pas homogène au sein de

l'Union Européenne. Il n'y avait pas de réelle homogénéité du contrôle de la solvabilité des entreprises d'assurance entre les différents membres du marché unique. Par exemple certains pays, comme la Finlande et le Royaume-Uni, imposaient des contraintes complémentaires à leurs assureurs.

Le projet réglementaire Solvabilité II a donc été initié dans les années 2000 par la Commission Européenne. La directive cadre est établie par les services de la Commission. Depuis 2004, l'EIOPA a été créée pour les questions plus techniques.

L'objectif de la directive Solvabilité II est « d'améliorer la protection des consommateurs, de moderniser la supervision, d'accroître l'intégration des marchés et de renforcer la compétitivité internationale des assureurs européens ».

Comme pour Bâle II, Solvabilité II s'articule autour de 3 piliers permettant une évaluation qualitative et quantitative des risques.

Pilier 1 : Ressources financières

Ce pilier définit les exigences des entreprises en capital. Cela concerne aussi bien les provisions techniques que les fonds propres. C'est une étude quantitative des seuils réglementaires nécessaires aux assureurs et réassureurs. À cet effet, deux niveaux de fonds propres vont être définis, le MCR (*Minimum Capital Requirement*) et le SCR (*Solvency Capital Requirement*). Le premier représente le capital minimum en dessous duquel l'autorité de contrôle pourra demander le retrait de l'agrément. Le second désigne le capital requis pour pouvoir faire face à une sinistralité exceptionnelle. Il se base sur une probabilité de ruine de 0,5% à un horizon d'un an, soit un cas tous les 200 ans.

Pilier 2 : Exigences de règles de contrôle

Le deuxième pilier concerne les exigences qualitatives de l'assureur. Il doit être capable d'apprécier de lui-même la mesure et la gestion de ses risques, à travers des systèmes de gouvernance opérationnels. Le pilier 2 a pour but de s'assurer que la compagnie est bien gérée et est en mesure de calculer et de maîtriser ses risques.

Pilier 3 : Exigences de communication

Ce pilier concerne les recommandations et les exigences pour les compagnies d'être plus transparentes. Il s'agit pour les compagnies d'assurance et de réassurance de communiquer auprès des autorités de contrôle et du public un ensemble d'éléments relatifs aux piliers 1 et 2.

2. Le long chemin de la directive Solvabilité II avant son entrée en vigueur

Le projet réglementaire Solvabilité II a mis du temps à se dessiner et l'entrée en vigueur a sans cesse été repoussée. Il aura fallu attendre sept années après l'adoption de la directive Solvabilité II par le Parlement Européen pour que la date d'entrée en vigueur (le 1er janvier 2016) soit entérinée.

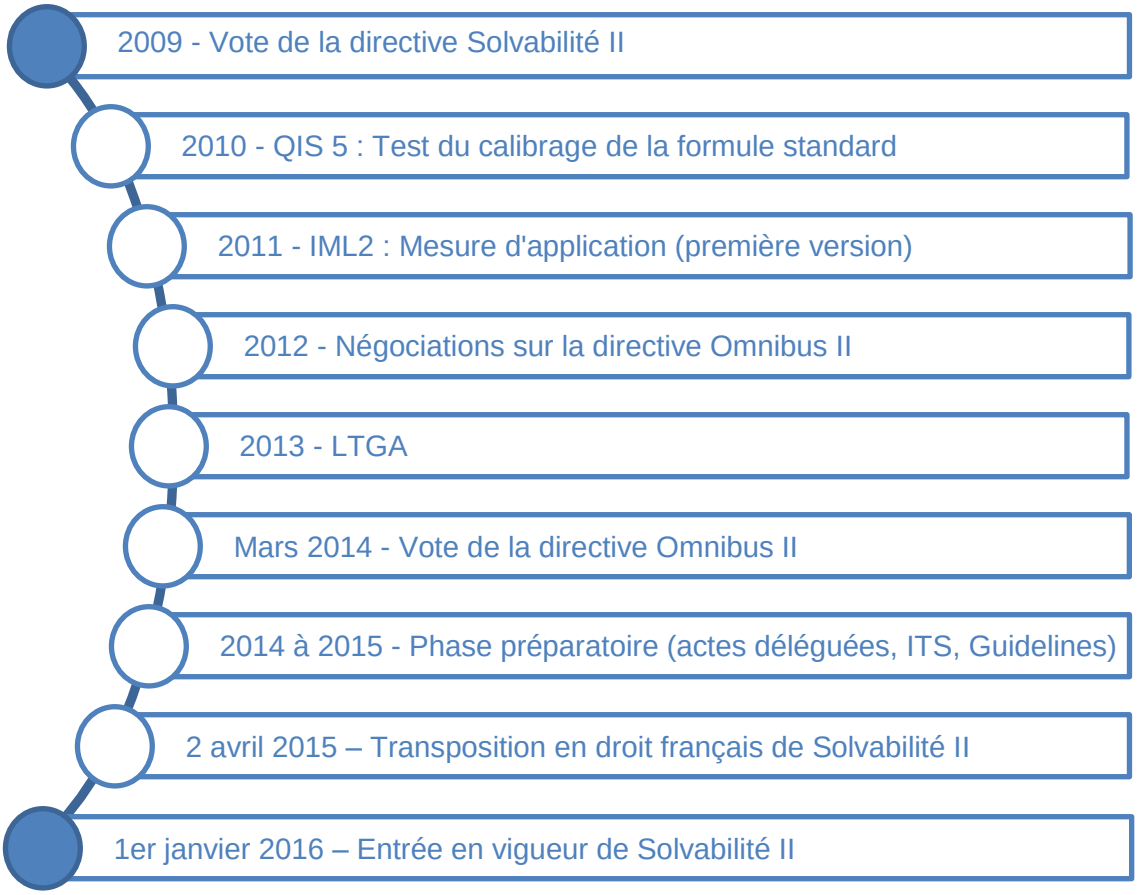


Figure 1 - Calendrier de la directive Solvabilité II

L'adoption de la directive a été précédée et suivie de nombreuses études quantitatives d'impact (QIS 1 à 5, LTGA) et de papiers de consultations afin de solliciter les assureurs et les réassureurs. Ces nombreuses consultations ont permis d'adapter les modalités d'application de la directive Solvabilité II afin de prendre au mieux en compte les risques liés à l'activité d'assurance et de réassurance.

La date d'entrée en vigueur définitive est donc le 1er janvier 2016. Auparavant, les échecs successifs du trilogue (la Commission Européenne, le Parlement Européen et le Conseil Européen) cherchant à trouver un accord sur la directive Solvabilité II ont repoussé à de maintes reprises la date d'entrée en vigueur du texte. La majorité des discussions a porté sur le calibrage des mesures contra-cycliques permettant de réguler les problèmes de volatilité des marchés sur la valorisation des bilans liés aux garanties à long terme.

La Commission Européenne, le Parlement Européen et les Etats membres sont parvenus à un accord sur la directive Solvabilité II dans la nuit du mercredi 13 novembre 2013. La directive Omnibus II a été adoptée. Cette directive technique a amendé la directive Solvabilité II de 2009 pour permettre son entrée en vigueur le 1er janvier 2016. La version finale Omnibus II a été achevée le 28 novembre 2013. Le texte a été voté par le Parlement Européen le 11 mars 2014.

Omnibus II prévoit également des mesures transitoires pour l'application de Solvabilité II (sur 16 ans au plus). Ces mesures portent sur l'application du pilier 1, sur les taux d'intérêt sans risque et sur les provisions techniques.

Depuis ce vote définitif par le Parlement Européen, le projet Solvabilité II est alors entré en phase préparatoire. La Commission Européenne a publié les actes délégués de Solvabilité II (textes de niveau 2). Ces actes délégués sont contraignants et d'application directe.

L'EIOPA a publié ses ITS (*Implementing Technical Standards*) et ses guidelines (orientations et recommandations), qui ont été adoptés par la Commission Européenne. Les ITS sont contraignants et directement applicables. En revanche, en ce qui concerne les guidelines, ce sont les autorités de contrôle nationales qui ont le choix de les faire appliquer ou non. Si une autorité décide de ne pas rendre obligatoires les dispositions d'une guideline, elle est tenue d'en informer l'EIOPA et de motiver sa décision : c'est le principe du « *comply or explain* ».

Après quinze années de préparation, la directive Solvabilité II a été transposée dans le droit français par une ordonnance du 2 avril 2015.

3. La définition de l'ORSA dans Solvabilité II et les précisions des différents acteurs

L'ORSA est l'acronyme *d'Own Risk and Solvency Assessment* : c'est un processus d'auto-évaluation des risques et de la solvabilité. L'ORSA trouve son fondement dans le pilier 2 de la directive. La notion de l'ORSA a été introduite par l'article 45 du chapitre 4 de la directive Solvabilité II. Cet article donne les principales missions et tâches à effectuer dans le cadre d'un processus de l'ORSA sans toutefois préciser tous les résultats à produire. Pour accompagner les assureurs et les réassureurs dans la mise en place de l'ORSA, les différents acteurs ont apporté des précisions sur ce texte.

Le texte réglementaire a été complété par une guideline de l'EIOPA. L'ACPR a mis en place des exercices préparatoires à l'ORSA en 2014 et en 2015 pour lesquels tous les acteurs du marché ont été sondés. Enfin, l'Institut des Actuaires a apporté sa valeur ajoutée à ce sujet avec le « groupe de travail ORSA ». Ces différentes contributions seront abordées dans les paragraphes suivants.

3.1. Définition de l'ORSA dans la directive Solvabilité II

L'article 45 de la directive stipule que :

« *1. Dans le cadre de son système de gestion des risques, chaque entreprise d'assurance ou de réassurance procède à une évaluation interne des risques et de la solvabilité.*

Cette évaluation porte au moins sur les éléments suivants :

a) le besoin global de solvabilité, compte tenu du profil de risque spécifique, des limites approuvées de tolérance au risque et de la stratégie commerciale de l'entreprise ;

b) le respect permanent des exigences de fonds propres prévues au chapitre VI, sections 4 et 5, et des exigences concernant les provisions techniques prévues au chapitre VI, section 2 ;

c) la mesure dans laquelle le profil de risque de l'entreprise s'écarte des hypothèses qui sous-tendent le Capital de Solvabilité Requis prévu à l'article 101, paragraphe 3, calculé à l'aide de la formule standard conformément au chapitre VI, section 4, sous-section 2, ou avec un modèle interne partiel ou intégral conformément au chapitre VI, section 4, sous-section 3.

2. *Aux fins du paragraphe 1, point a), l'entreprise concernée met en place des procédures qui sont proportionnées à la nature, à l'ampleur et à la complexité des risques inhérents à son activité et qui lui permettent d'identifier et d'évaluer adéquatement les risques auxquels elle est exposée à court et long terme, ainsi que ceux auxquels elle est exposée, ou pourrait être exposée. L'entreprise démontre la pertinence des méthodes qu'elle a utilisées pour cette évaluation.*
3. *Dans le cas visé au paragraphe 1, point c), lorsqu'un modèle interne est utilisé, l'évaluation est effectuée parallèlement au recalibrage qui aligne les résultats du modèle interne sur la mesure de risque et le calibrage qui sous-tendent le Capital de Solvabilité Requis.*
4. *L'évaluation interne du risque et de la solvabilité fait partie intégrante de la stratégie commerciale, et il en est tenu systématiquement compte dans les décisions stratégiques de l'entreprise.*
5. *Les entreprises d'assurance et de réassurance procèdent à l'évaluation prévue au paragraphe 1 sur une base régulière et immédiatement à la suite de toute évolution notable de leur profil de risque.*
6. *Les entreprises d'assurance et de réassurance informent les autorités de contrôle des conclusions de chaque évaluation interne du risque et de la solvabilité, dans le cadre des informations à fournir en vertu de l'article 35.*
7. *L'évaluation interne des risques et de la solvabilité ne sert pas à calculer un montant de capital requis. Le Capital de Solvabilité Requis (SCR) ne peut varier que conformément aux articles 37, 231, 233 et 238.* ».

L'article 45 de la directive précise le cadre de l'ORSA en distinguant deux fonctions du processus : l'une est de procéder au contrôle de la solvabilité en interne, l'autre est de communiquer les résultats auprès des autorités de contrôle.

Cet article décrit l'ORSA comme un outil du processus de gestion des risques qui exige des entreprises d'assurance et de réassurance d'évaluer correctement leurs propres risques, à court et à long terme, et le montant des fonds propres nécessaires pour les couvrir. L'ORSA n'est pas un outil de calcul d'exigence de fonds propres mais un outil d'analyse de la sensibilité des résultats au profil de risque. Les entreprises sont tenues d'écrire le processus qu'elles ont mis en place afin de satisfaire aux exigences de reporting de la directive. L'ORSA représente donc une source importante d'informations pour les autorités de contrôle.

L'ORSA est un outil prospectif de l'évaluation de la solvabilité des assureurs. Cela suppose de prendre en compte les stratégies de l'entreprise et leurs impacts sur le profil de risque de sorte à évaluer la solvabilité dans le temps de l'assureur. Cela représente une analyse pertinente pour la définition des objectifs, le choix du traitement des risques, l'évaluation du risque résiduel et le contrôle dans le système de gestion des risques.

Les résultats de l'ORSA doivent être communiqués aussi bien à l'organe de direction de l'entreprise pour les décisions stratégiques qu'à l'autorité de contrôle. L'ORSA intervient donc également dans l'étape communication du système de gestion des risques.

Les trois éléments de l'ORSA cités dans le premier paragraphe de l'article 45 (évaluation du besoin global de solvabilité, respect permanent des exigences de capital, évaluation du profil de risque) sont interdépendants. Ils ont tous pour objectif d'encourager les entreprises à mieux analyser leurs risques existants et futurs et à utiliser des outils de gestion des risques dans la prise de décisions stratégiques.

L'ORSA doit être mis en place et implémenté par le département en charge de la gestion des risques. L'organe de direction de l'entreprise est directement responsable de l'ORSA. Il doit approuver et revoir régulièrement les hypothèses, y compris les décisions de management, et les paramètres utilisés dans l'ORSA. Il doit également approuver les résultats produits par l'ORSA.

a) Evaluation du besoin global de solvabilité

Le besoin global de solvabilité comprend le besoin de fonds propres de l'assureur pour couvrir ses engagements, compte tenu de son profil de risque.

L'article 45 de la directive stipule que l'entreprise doit mettre en place des procédures afin d'identifier et de mesurer les risques auxquels elle est exposée à court et à long terme.

Pour calculer l'évaluation du besoin global de solvabilité en prenant en compte le profil de risque propre à l'assureur, il convient de réaliser une évaluation prospective sur la base des hypothèses et des stratégies de développement de l'entreprise.

Cette projection doit permettre à l'entreprise d'avoir une idée de son besoin de solvabilité futur et du niveau de fonds propres disponibles en fonction de ses objectifs stratégiques.

Pour cette projection, l'EIOPA demande aux entreprises de prendre en compte les facteurs externes qui pourraient avoir un impact significatif sur les fonds propres économiques et sur le besoin de capital (changement des conditions de marché, de l'environnement législatif, du développement technologique ayant un impact sur le risque de souscription...), ainsi que les management actions pour répondre à ces changements. L'assureur doit décider lui-même comment effectuer cette évaluation, en se basant sur le profil de risque de son entreprise. Pour cela, il doit tenir compte de la nature, de l'ampleur et de la complexité de ses risques dans le paramétrage de son évaluation.

b) Respect permanent des exigences de capital

A chaque instant, l'entreprise doit couvrir les exigences de capital imposées par Solvabilité II (SCR et MCR). L'ORSA doit inclure une vérification de la suffisance des fonds propres éligibles sur tout l'horizon de projection du business plan par rapport à ces exigences de capital.

L'EIOPA précise que ce respect permanent ne suppose pas de calculer les exigences de capital à chaque instant. La fréquence de calcul doit être liée à la volatilité des fonds propres économiques et de l'exigence de capital. D'une manière générale, le montant de capital requis doit être recalculé si le profil de risque de l'entreprise évolue significativement au cours de la projection.

c) Evaluation du profil de risque

L'évaluation consiste à étudier les différences qui peuvent exister entre le montant du besoin global de solvabilité calculé par l'assureur et le montant de SCR.

Beaucoup d'éléments peuvent être à l'origine de ces différences. L'entreprise peut considérer un niveau de confiance différent de 99,5% à un an. Par exemple, elle peut évaluer son besoin de capital dans le but d'obtenir une certaine notation, ce qui nécessite la plupart du temps un niveau de confiance plus élevé.

Une autre explication peut provenir d'un profil de risque de l'entreprise qui dévie du profil de risque sur lequel est basé le calibrage de la formule standard (par exemple, une branche d'activité dont le risque n'est pas bien reflété dans la formule standard).

Dans l'ORSA, l'entreprise peut également être amenée à utiliser un horizon de projection différent d'un an. Il peut être aligné sur l'horizon stratégique de l'assureur dans l'ORSA. L'assureur prend également en considération les actions du management qui ont un impact sur le profil de risque de l'entreprise.

3.2. Précisions apportées par l'EIOPA

Contrairement au pilier 1, la directive ne précise pas la façon dont les calculs doivent être effectués dans le cadre de l'ORSA. Le texte laisse une grande liberté d'interprétation et d'implémentation aux assureurs. Cette flexibilité est bénéfique pour les entreprises. Comme nous avons déjà pu l'expliquer auparavant, le calibrage des risques dans le pilier 1 n'est pas nécessairement adapté à chaque assureur. Certains risques ne sont également pas pris en compte et le pilier 2 permet d'y remédier.

En mai 2008, un Issues Paper sur l'ORSA a été publié par l'EIOPA. Il n'a pas été prévu de mesures d'exécution sur l'ORSA. Toutefois, compte tenu du caractère nouveau de cette exigence, l'EIOPA a souhaité lancer une consultation sur le sujet pour donner plus de précisions en la matière. Dans l'Issues Paper sur l'ORSA, l'EIOPA expose ses points de vue sur la définition et l'importance de l'ORSA en tant qu'outil de gestion des risques. Il donne des précisions sur les points mentionnés par l'article 45 de la directive et émet des recommandations sur le processus de l'ORSA.

L'EIOPA a défini l'ORSA comme « l'ensemble des processus et des procédures utilisés pour identifier, évaluer, contrôler, gérer et rendre compte des risques à court terme et à long terme de l'entreprise et à déterminer les fonds propres nécessaires pour satisfaire le besoin global de solvabilité à tout moment ».

Le principal intérêt de l'ORSA selon l'EIOPA est d'aider les entreprises à avoir une meilleure compréhension de leurs propres risques et de leurs besoins globaux de solvabilité correspondants, et à déterminer un montant de capital en prenant en compte les spécificités des risques de chaque entreprise. L'ORSA permet également de renforcer la culture de la gestion des risques de l'entreprise et à avoir une vision prospective sur l'impact des changements de profil de risque (dus à l'environnement externe, aux décisions stratégiques, etc.) sur son besoin global de solvabilité.

Cette consultation a été suivie d'une nouvelle consultation en novembre 2011. A la suite de cette seconde consultation, le rapport final présente 24 orientations sur la mise en place de l'ORSA.

Pour finir, l'EIOPA a synthétisé ses travaux dans une guideline publiée le 14 septembre 2015 (*Orientations relatives à l'évaluation interne des risques et de la solvabilité - EIOPA-BoS-14/259 FR*) et qui a été approuvée par la Commission Européenne. Le texte précise 20 orientations. Ces lignes directrices visent à fournir des détails supplémentaires sur la façon dont l'ORSA doit être interprété. Nous les détaillerons dans le paragraphe 1.3 du chapitre suivant.

3.3. Précisions apportées par l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution

Suite à l'accord tripartite du 13 novembre 2013, l'ACPR s'est inscrite dans une démarche de mise en œuvre par les assureurs d'un ORSA conforme à Solvabilité II dès 2016.

En 2013, l'ACPR a lancé une opération d'ORSA pilote qui était une consultation auprès d'un échantillon réduit d'organismes menant un ORSA blanc. Les objectifs de cet exercice étaient de pouvoir acquérir de l'expérience sur les différentes questions et difficultés qui se posent aux organismes développant leur ORSA. Cette consultation a ainsi permis de mieux comprendre la manière dont les organismes appréhendent les différentes parties de l'ORSA et les exigences de la réglementation Solvabilité II dans ce domaine. Enfin, elle a permis de préparer le calibrage d'un exercice d'ORSA préparatoire prévu en 2014 pour l'ensemble des organismes et groupes.

Sur la base des enseignements de l'opération d'ORSA pilote lancée en 2013, l'ACPR a formulé un certain nombre d'indications. L'objectif de celles-ci était principalement d'alerter les organismes et groupes sur certains points jugés plus spécifiquement importants.

Ensuite, lors de sa conférence du 12 décembre 2013, le secrétariat général de l'Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution a présenté un calendrier de préparation du marché français à ce nouveau régime prudentiel, en cohérence avec les orientations de l'EIOPA. Des exercices de préparation ont été proposés à l'ensemble du marché français pour 2014 et 2015. Ces exercices consistaient à la remise d'un rapport sur l'évaluation interne des risques et de la solvabilité (ou rapport « ORSA ») au niveau groupe. Celui-ci devait couvrir les trois évaluations de l'ORSA.

En février 2015, l'ACPR a publié une analyse de l'exercice 2014 de préparation à Solvabilité II. L'analyse des rapports ORSA a mis en évidence des marges de progression, notamment dans l'appropriation du rapport par les organismes.

De nombreux rapports ont été externalisés. Bien que le recours à une société de conseil ne soit pas interdit (et il peut même générer une plus-value), l'ACPR a noté un manque d'appropriation de ce rapport par les organes dirigeants. En particulier, la dimension stratégique est souvent absente des ORSA rédigés par des tiers, alors qu'elle est essentielle.

Peu d'assureurs ont inclus les éléments du rapport ORSA dans leur prise de décisions, qu'elles soient stratégiques ou opérationnelles. D'après l'ACPR, c'est le cas pour seulement 29% des entreprises. Le rapport ORSA est davantage perçu comme un reporting à destination de l'ACPR que comme un outil d'aide à la décision stratégique.

L'exercice préparatoire de 2015 a été commenté et analysé par l'ACPR en décembre 2015. L'ACPR a observé une augmentation du taux de participation et « une implication accrue des instances dirigeantes, gage d'appropriation de la démarche ORSA par les organismes ». L'ACPR a globalement constaté une meilleure couverture des trois exercices exigés dans le cadre de l'ORSA.

Des axes d'amélioration existent toujours, notamment en ce qui concerne la gouvernance et la gestion des risques. L'ACPR précise que « la qualité des mesures compensatoires et actions correctrices proposées peut encore être améliorée. Souvent, il s'agit de la reprise de mesures déjà identifiées, dont les effets sont insuffisamment quantifiés. Elles se révèlent souvent peu en phase avec les problèmes concrets rencontrés par les organismes ». La quantification du Besoin Global de Solvabilité (BGS) laisse également à désirer. L'ACPR précise que « l'évaluation du BGS est encore trop rarement quantifiée. Pour les risques quantifiables, il est important que les organismes n'hésitent pas à proposer une évaluation chiffrée du BGS, dans la mesure où celui-ci ne peut déboucher automatiquement sur la mise en place d'un capital add-on ». L'ACPR préconise également aux assureurs de rendre leur rapport de solvabilité plus lisible afin « de faciliter la lecture du rapport et la compréhension de son contenu par le conseil d'administration ».

Les assureurs et les réassureurs français ont donc encore du travail à effectuer afin de s'accaparer complètement cet exercice ORSA. Il ne doit pas être perçu seulement comme une obligation légale, mais également comme une nécessité de faire évoluer les entreprises afin de prendre en compte la gestion des risques dans la définition des objectifs stratégiques et dans la prise de décisions stratégiques et opérationnelles.

3.4. Précisions apportées par l'Institut des Actuaires

Le 14 mars 2014, l'Institut des Actuaires a présenté les travaux de son « groupe de travail ORSA ».

Ce document constitué avec la contribution de plusieurs assureurs de la place vise à décrire et donner quelques exemples des étapes de mise en œuvre de l'ORSA. Il donne des exemples concrets permettant de comprendre un peu mieux quelles sont les différentes pistes envisageables ou envisagées par certains acteurs. Néanmoins, chaque exemple donné est spécifique et n'illustre en

aucun cas une méthode générique. Le texte propose également un exemple de plan pour le rapport ORSA.

Ces travaux soulèvent un large spectre de problématiques liées à l'ORSA mais ils ne peuvent décrire toutes les solutions possibles adaptées à la taille, au profil de risque et à la complexité des opérations de la compagnie.

Chapitre 2 : L'ORSA, une prise en compte de la gestion des risques dans les objectifs stratégiques

Les sociétés d'assurance sont exposées à de nombreux risques, intrinsèquement liés à leur activité et plus particulièrement à l'inversion du cycle de production qui caractérise le monde de l'assurance. L'assureur se retrouve de fait confronté à une incertitude sur les sinistres à régler et une forte exposition aux variations des marchés financiers.

La directive Solvabilité II définit de nouvelles exigences pour les entreprises d'assurance et de réassurance. Comme le montre l'article sur l'ORSA, Solvabilité II n'impacte pas seulement le montant de leurs réserves, mais également leur façon de faire et de voir les choses. La directive amène les assureurs à revoir la stratégie globale de leur entreprise. En plus de modifier leur méthode de calcul de fonds propres, les entreprises vont devoir mettre en place un système de gouvernance efficace. C'est au cœur de ce système que l'ORSA s'exprime.

La raison d'être de l'assurance est la souscription, la mutualisation et la répartition des risques, de sorte à limiter les conséquences financières défavorables liées à la survenance d'événements particuliers pour les souscripteurs de contrats. Pour cette raison, une compréhension fine de chaque type de risques, de leurs caractéristiques et de leurs interdépendances, de leurs sources et de leurs impacts potentiels sur l'activité, est essentielle pour les assureurs. Les autorités de contrôles doivent dans ce cadre s'assurer que les assureurs ont une bonne compréhension de leurs risques. Elles doivent également s'assurer qu'ils mettent en œuvre une politique de gestion des risques adaptée. L'objectif ultime de l'assurance est de protéger les assurés tout en ayant une gestion efficace des ressources en capital.

L'objectif commun de la gestion des risques et du capital est de protéger les apporteurs de capital et les assurés contre la survenance d'événements adverses. Les assureurs sont donc logiquement amenés à combiner la gestion des risques et du capital afin de décider d'objectifs stratégiques en relation avec l'environnement de risques dans lequel ils évoluent.

1. L'ORSA, partie intégrante du système de gestion des risques

L'article 45 de la directive précise clairement que l'ORSA doit faire partie intégrante du système de gestion des risques de l'entreprise. L'ORSA est un outil de gestion des risques important pour les organismes d'assurance. C'est un processus qui intervient dans toutes les étapes du système de gestion des risques. L'ORSA doit servir aux assureurs afin de disposer de leur propre compréhension des risques auxquels ils sont exposés. Cela les oblige donc à identifier, évaluer et contrôler ces risques. Cette évaluation est essentielle et ne comprend pas uniquement les risques présents dans la formule standard. L'ORSA impose de prendre en considération les risques spécifiques auxquels l'organisme d'assurance est confronté.

1.1. Définition du système de gestion des risques dans Solvabilité II

Le système de gouvernance et de gestion des risques est défini à travers le chapitre 4 de la directive Solvabilité II et des articles 41 à 49. Il comprend d'ailleurs l'article 45 qui traite de l'ORSA.

Ces articles traitent notamment des exigences en matière de gouvernance (article 41), de la gestion des risques (article 44), du contrôle interne (article 46), de l'audit interne (article 47) et de la fonction actuarielle (article 48).

La directive stipule l'exigence de mettre en place un système de gouvernance adéquat, efficace et adapté à la taille de l'entreprise. Ce dispositif doit clairement être défini et doit posséder une politique écrite (article 41). Les compagnies d'assurance et de réassurance doivent intégrer à leur structure organisationnelle un dispositif de gestion des risques efficace. Ce dispositif doit être capable d'identifier et de suivre correctement les risques auxquels l'entreprise est confrontée. Il doit être intégré au dispositif de prise de décision et pris en compte par les dirigeants responsables de l'entreprise (article 44). La directive impose aux entreprises de mettre en place un système de contrôle interne. Il a pour objectif de veiller au respect de la bonne application des dispositions de Solvabilité II et d'évaluer l'impact d'un changement législatif sur les activités de la compagnie (article 46). Les entreprises doivent également mettre en place une fonction d'audit interne. Cette fonction évalue l'efficacité du système de gouvernance (article 47). La directive précise enfin les missions et le rôle des fonctions actuarielles au sein des compagnies d'assurance et de réassurance. Ces fonctions doivent être remplies par des personnes ayant des compétences à la hauteur des risques propres à l'activité de l'entreprise (article 48).

La directive Solvabilité II exige donc des compagnies d'assurance et de réassurance qu'elles mettent en place un dispositif de gouvernance et de gestion des risques. C'est à ce dispositif que l'ORSA prend part.

1.2. Procédures majeures pour la mise en place du système de gestion des risques

Afin d'accompagner les entreprises dans la mise en place du système de gouvernance et de gestion des risques, l'EIOPA a publié le 14 septembre 2015 une guideline sur la gouvernance (*Orientations relatives au système de gouvernance – EIOPA-BoS-14/253 FR*). Le texte précise 70 lignes directrices de la gouvernance des organismes d'assurance.

Ces orientations définissent les procédures à suivre afin d'être en mesure de mettre en place un système de gestion des risques efficace.

Les entreprises d'assurance et de réassurance doivent notamment prendre les mesures appropriées pour développer un système efficace de gouvernance, en accord avec Solvabilité II, qui permettra un management prudent. Elles doivent également développer un système de gestion des risques efficace intégrant les stratégies, les procédures et le reporting nécessaires à l'identification, la mesure et la gestion des risques individuels (guideline 1.15, orientation 1).

Ces lignes directrices visent à donner des principes généraux sur la structure organisationnelle de l'entreprise sans les restreindre dans le choix de l'organisation, à condition qu'elles établissent une séparation appropriée des fonctions et des tâches (orientation 2). Elles introduisent la notion des fonctions clés (fonction de gestion des risques, fonction de contrôle interne, fonction d'audit interne et fonction actuarielle) à mettre en place dans l'entreprise (orientation 1). Elles exigent également que l'entreprise établisse une politique écrite et cohérente sur les objectifs poursuivis, les tâches à exécuter, les processus et les reporting appliqués, et l'obligation d'information et de communication (orientation 7). Une politique de gestion des risques doit également être établie (orientation 18). Les prises de décisions importantes doivent être validées par au moins deux personnes dirigeantes et doivent être documentées de manière appropriée (orientation 3 et 4). Par ailleurs, le système de gestion des risques, la planification d'urgence et les questions de rémunération doivent être revus régulièrement et mis à jour au besoin afin d'avoir une gestion saine et prudente de l'entreprise (orientation 6 et 8).

Le système de gestion des risques ainsi mis en place doit être supervisé par un dirigeant, qui fixe l'appétence au risque et approuve les principales stratégies et politiques de gestion des risques (orientation 17).

1.3. Principes majeurs pour la mise en place de l'ORSA

Comme pour le dispositif de gestion des risques, l'EIOPA a publié le 14 septembre 2015 une guideline sur l'ORSA (*Orientations relatives à l'évaluation interne des risques et de la solvabilité - EIOPA-BoS-14/259 FR*). Le texte précise 30 orientations sur la procédure à suivre pour l'application de la directive Solvabilité II et de l'ORSA.

a) Principe de proportionnalité

Le développement de l'ORSA doit être proportionné à la taille de l'entreprise. L'assureur doit développer son propre processus ORSA de manière à s'inscrire dans la structure organisationnelle et dans le système de gestion des risques avec des techniques appropriées et adéquates pour évaluer son besoin global de solvabilité, en prenant en considération la graduation naturelle et la complexité des risques inhérents à son activité (orientation 1).

b) Rôle de l'organe de direction

L'assureur doit s'assurer que l'organe de direction prenne une part active dans le processus ORSA en déterminant comment l'évaluation doit être réalisée et comment ses résultats doivent être challengés (orientation 2).

c) Documentation

L'assureur doit documenter sa politique ORSA et chaque processus ORSA. Il doit également rédiger un rapport ORSA interne ainsi qu'un rapport ORSA à destination de l'ACPR (orientation 3).

La politique ORSA doit être, entre autre, constituée d'un descriptif des processus et des procédures en place pour piloter l'ORSA. Elle doit comporter une considération du lien entre le profil de risque, les limites approuvées de tolérance au risque et les besoins globaux de solvabilité. Elle doit également inclure la nature des stress-tests et la fréquence de réalisation de l'évaluation du besoin global de solvabilité (orientation 4).

d) Fréquence et actualisation de l'ORSA

L'article 45 de la directive stipule que «*... Les entreprises d'assurance et de réassurance procèdent à l'évaluation prévue au paragraphe 1 sur une base régulière et immédiatement à la suite de toute évolution notable de leur profil de risque ... ».*

L'EIOPA a interprété « sur une base régulière » comme au minimum une fois par an. L'entreprise doit définir sa propre fréquence pour l'implémentation de l'ORSA en tenant compte de son profil de risque. La fréquence choisie nécessite de faire l'objet d'une justification (orientation 14).

Pour faciliter la justification, l'organisme d'assurance doit définir dans son processus ORSA la fréquence et les critères d'actualisation de l'ORSA.

Par exemple, l'entreprise peut définir une fréquence fixe d'un an et, pour l'actualisation de l'ORSA, lister les événements déclencheurs. Ces éléments déclencheurs peuvent être par exemple une fusion acquisition, une crise financière, un événement catastrophes (naturelles ou humaines), des changements réglementaires, la faillite d'un réassureur, etc.

e) Lien entre le processus de gestion stratégique et le cadre décisionnel

L'assureur doit s'assurer que les résultats du processus ORSA sont pris en compte par le système de gouvernance notamment les points relatifs au management du capital à long terme, au business plan et au développement, et à la conception de produits (orientation 13).

2. Mise en œuvre de l'ORSA

Les compagnies d'assurance doivent mettre en place un processus ORSA dans le respect de la directive Solvabilité II et des guidelines publiées.

Le calcul du besoin global de solvabilité diffère du calcul du Capital de Solvabilité Requis (SCR) et nécessite des étapes préalables qui lui sont propres. Le BGS doit être calculé sur des risques et un horizon de projection propres à l'activité de l'assureur (alors que le SCR est calculé sur les risques du pilier 1 à minima et sur un horizon d'un an), tout en tenant compte des management actions et des affaires nouvelles sur l'horizon de projection (alors que ces éléments ne sont pas pris en compte dans le calcul du SCR).

La mise en œuvre opérationnelle de l'ORSA est propre à chaque assureur mais trois sous-processus clés peuvent être identifiés. Ces étapes ne sont pas nécessairement spécifiques à l'ORSA et interviennent également dans le processus de gestion des risques.

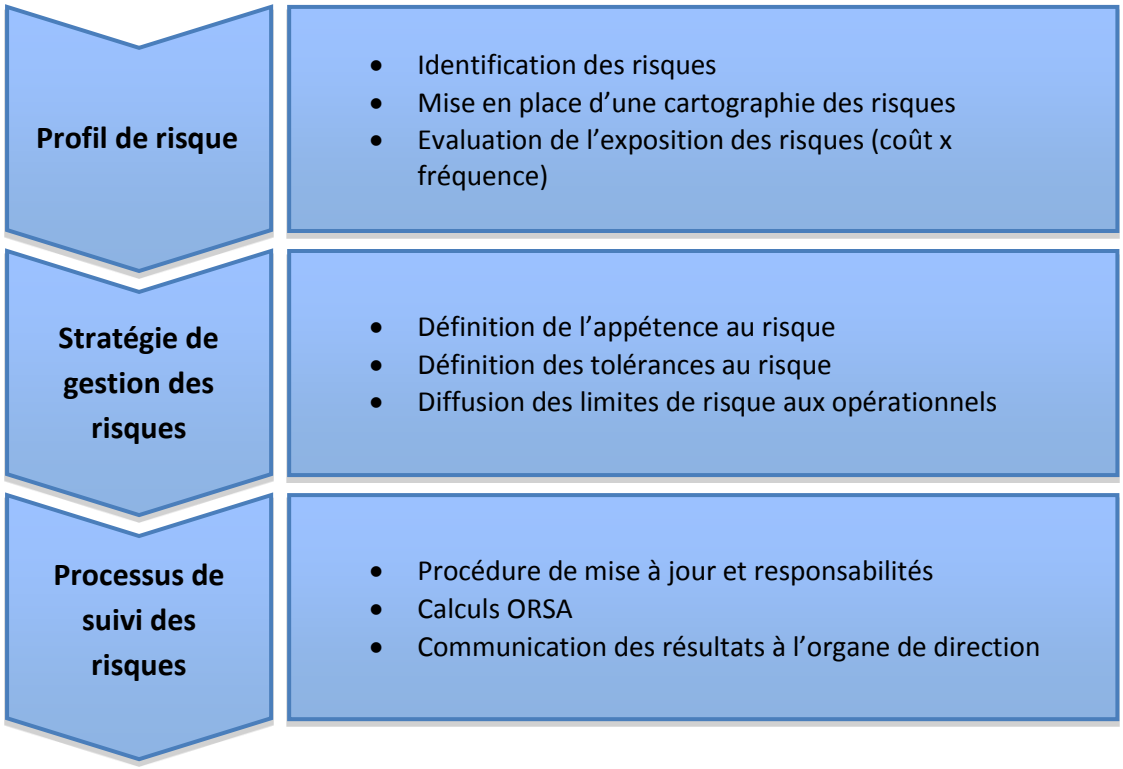


Figure 2 - Les étapes clés d'un processus ORSA

2.1. Détermination du profil de risque

Les compagnies d'assurance et de réassurance doivent être à même d'identifier les risques auxquels elles sont exposées. Pour y parvenir, l'assureur détermine son profil de risque.

La réalisation d'une cartographie des risques permet de définir ce profil de risque. Cette cartographie liste les risques auxquels l'assureur est exposé, chiffre son exposition (en fréquence et en montant) et les moyens mis en place pour s'en protéger. Les risques identifiés peuvent correspondre aux risques énoncés dans le pilier 1 de la directive mais également aux risques propres à l'assureur, en fonction de ses spécificités.

Cette cartographie doit être réalisée en impliquant le maximum de services au sein de la compagnie d'assurance, afin d'être le plus exhaustif possible et le plus juste. Pour un même risque, la perception peut être différente selon les directions métiers impliquées. La cartographie peut donc être découpée par risque et direction afin de s'assurer de ne rien omettre. De manière générale, cette façon de procéder permet également de diffuser la culture de la gestion des risques plus facilement au sein de l'entreprise. L'organe de direction est également capable de mesurer la pertinence des moyens de protection mis en place par chaque direction prise séparément.

2.2. Définition de la stratégie de gestion des risques

Une fois le profil de risque établi, l'organe de direction doit définir la stratégie de gestion de ces risques. Il est ainsi défini l'appétence au risque et les tolérances au risque de la compagnie. Par définition, une compagnie d'assurance prend certains risques, sachant qu'il existe d'autres risques qu'elle ne peut éviter mais qu'elle ne recherche pas. L'appétence au risque est au cœur de la vie d'une compagnie : toutes les compagnies d'assurance ont une appétence au risque, qu'elles en soient conscientes ou non, mais sa définition claire permet d'en assurer une mise en œuvre cohérente. L'importance de l'appétence au risque est qu'elle permet de faire le lien entre la stratégie et le *risk management*.

Les définitions de l'appétence au risque et des tolérances au risque utilisées par les différents acteurs du marché ne sont pas toujours homogènes. Il n'y a pas une norme de marché fixant une définition officielle de la notion d'appétence au risque. Il n'est pas rare de rencontrer des interprétations différentes, possiblement contradictoires, entre les assureurs.

L'appétence au risque peut être définie comme le niveau agrégé de risque que l'entreprise est prête à prendre, dans la réalisation de ses objectifs stratégiques (rentabilité, croissance, etc.), à l'horizon de son Business Plan. Il s'agit d'un arbitrage à effectuer entre rentabilité et sécurité. La définition de l'appétence au risque vise à se conformer non à une appétence imposée par le régulateur, mais à l'appétence qui est celle propre à la compagnie. La détermination de l'appétence au risque ne doit pas générer un processus compliqué. C'est un outil de communication entre le conseil d'administration et l'équipe dirigeante de la compagnie d'assurance.

Les tolérances au risque représentent la déclinaison de l'appétence sur les différents risques identifiés. Elles permettent ainsi de privilégier une exposition au risque plus forte sur des risques cœur de métier par rapport à des risques annexes. C'est également une possibilité de limiter certains risques selon la culture de l'entreprise ou selon les anticipations macro-économiques de l'assureur.

Une fois cette politique de gestion des risques établie, elle doit être déclinée opérationnellement en limites de risque. La stratégie de gestion des risques est alors quantifiée. Pour un risque donné, une exposition peut ainsi être traduite par une valeur chiffrée et un indicateur déterminé. Par exemple, la tolérance au risque action peut être traduite par un pourcentage des actifs sur les actions. La tolérance au risque de mortalité peut être traduite par un montant global de capitaux sous risque décès. Cette transformation permet aux entités opérationnelles de suivre au jour le jour l'exposition à chaque risque et de veiller au respect de la stratégie de l'entreprise.

2.3. Définition du processus de suivi du risque

Une fois la stratégie de gestion des risques arrêtée par l'organe de direction, le processus de suivi des risques doit être précisé. Il doit déterminer la périodicité des contrôles et les responsables des processus de contrôle et de reporting de l'exposition aux risques. Des règles doivent définir les correctifs à apporter en cas de dépassement des limites de risques. Dans ce processus de suivi des

risques, les calculs ORSA sont réalisés pour notamment mesurer l'exposition future de l'entreprise aux risques identifiés.

Le processus de suivi des risques doit préciser la fréquence d'actualisation de ces calculs. Comme nous l'avons vu précédemment, des événements exceptionnels (fusion, changement macro-économique ou réglementaire, etc.) peuvent exiger des mises à jour des calculs en dehors de la périodicité déterminée.

Pour finir, le processus de suivi des risques doit communiquer aux organes dirigeants les résultats de ce suivi. Ces rapports doivent être inclus dans les prises de décisions stratégiques (création d'un nouveau produit, souscription d'un programme de réassurance, etc.) en présentant une image de l'entreprise avant et après.

3. Appropriation de la culture des risques chez les assureurs avec l'ORSA

La capacité d'une entreprise à évaluer les risques auxquels elle est confrontée est cruciale dans la mise en œuvre d'un régime basé sur les risques, tel que celui exigé par la directive Solvabilité II. L'approche basée sur l'exposition aux risques nécessite de la part des entreprises de disposer d'un montant de fonds propres proportionné aux risques auxquels l'entreprise est exposée. L'ORSA représente avant tout la bonne compréhension de la part de l'entreprise de ses risques, de son besoin global de solvabilité et de ses fonds propres détenus.

La méthode de calcul standard du SCR (*Solvency Capital Requirement*) introduit une exigence de capital qui vise à prendre en compte tous les risques quantifiables observés au sein d'une entreprise d'assurance classique. Elle ne peut cependant pas couvrir tous les risques matériels auxquels une entreprise spécifique est exposée. Une formule standard est, par nature, une méthode de calcul standardisée et n'est pas adaptée aux situations d'une entreprise spécifique. Dans certaines conditions, la formule standard a tendance à ne pas refléter correctement les risques d'une entreprise et par conséquent à fournir un besoin global de solvabilité erroné.

Dans le cadre de Solvabilité II, l'utilisation de la méthode de calcul standard du SCR ne dispense donc pas les entreprises d'évaluer les fonds propres dont elles ont besoin en regard des risques auxquels elles sont ou pourraient être confrontées. En plus d'avoir suffisamment de fonds propres pour couvrir l'exigence de fonds propres réglementaire, l'entreprise doit évaluer la pertinence de cette exigence en fonction de ses risques. C'est dans ce contexte que le dispositif de gestion des risques a toute son importance.

L'utilisation de l'ORSA au sein du processus de gestion des risques permet d'affiner la mesure des risques auxquels l'entreprise est exposée ainsi que l'impact de la politique de gestion des risques. Les informations ainsi fournies dans le cadre de l'ORSA peuvent permettre aux entreprises de compléter le besoin réglementaire de fonds propres (Illustration par le schéma ci-dessous).

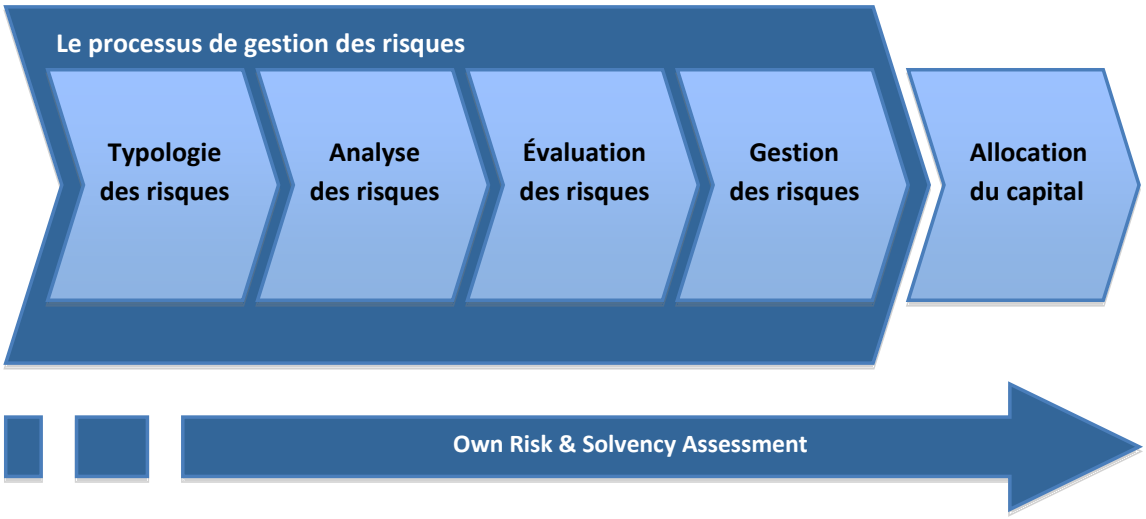


Figure 3 - Utilisation de l'ORSA dans le processus de gestion des risques

L'appariement des fonds propres et des profils de risques devrait aider à promouvoir une culture forte de gestion du risque, un élément clef de l'ORSA et, plus largement, d'une gestion saine d'une entreprise. Dans ce but, la directive encourage les entreprises d'assurance et de réassurance à adopter un dispositif de gouvernance et de gestion des risques efficace, afin qu'elles soient en mesure d'apprécier par elles-mêmes leurs risques. L'ORSA est un élément central de ce dispositif et permet de renforcer cette culture des risques à tous les niveaux de l'entreprise. Une bonne organisation repose sur une appétence au risque clairement définie et partagée par l'ensemble du management.

La production de l'ORSA ne se résume pas à la production de calculs et de rapports. Les travaux engagés dans le cadre de l'ORSA impliquent une réflexion de la part de l'organe dirigeant sur le dispositif à mettre en place afin d'inclure la gestion des risques dans le processus de prise de décisions. L'ORSA et notamment la rédaction du rapport ORSA doit permettre à l'entreprise de démontrer qu'elle possède un système de gestion des risques correctement implémenté, efficace et diffusé au sein de l'entreprise. Cette culture des risques doit être partie intégrante de l'entreprise et avoir un impact sur les objectifs stratégiques et la politique interne.

Chapitre 3 : Les management actions, un élément essentiel de la modélisation ORSA

Dans le cadre de l'ORSA et pour l'évaluation du besoin global de solvabilité, il convient de faire une évaluation prospective de l'entreprise en tenant compte du profil de risque. Il est relativement aisé de projeter à horizon un an la situation d'une entreprise. La politique de la compagnie est représentée par les hypothèses de départ et le résultat se trouve proche de ce qui peut être escompté dans la réalité. Sur un intervalle d'un an, la cohérence entre les paramètres initiaux et la situation de l'entreprise demeure généralement bonne.

Il en est tout autrement lorsque l'on essaye de projeter une entreprise sur un horizon plus long. Un événement inattendu peut alors dégrader sa situation et les paramètres initiaux se trouver inadaptés au nouveau contexte dans lequel évolue l'entreprise. En introduisant des management actions dans la modélisation, le modèle est alors évolutif et la politique de l'entreprise s'adapte à ce nouveau contexte. Cela permet d'apporter du réalisme à la projection et de tenir compte du profil de risque établi par les dirigeants.

1. La définition du management action

Les management actions, ou actions du management en français, désignent les mesures que le top management d'un organisme d'assurance pourrait entreprendre dans différentes situations de marché. Ils permettent de modéliser les actions que l'entreprise pourrait initier si un indicateur de performance ou un indicateur financier franchit un certain seuil. Les résultats de l'entreprise peuvent ainsi être projetés sur un horizon lointain, tout en gardant une certaine cohérence dans les résultats.

Les management actions représentent donc la politique de gestion des risques de l'entreprise. Ils permettent de modéliser les leviers de pilotage que mettra en œuvre le management en présence d'une situation défavorable conduisant à une dégradation du profil de risque.

Toutefois, les management actions doivent correspondre à des décisions qui vont être réellement prises par le top management dans un contexte particulier. Il ne faut pas biaiser le résultat en introduisant des management actions qui ne vont pas être accomplis dans la réalité. De plus, ils doivent se baser sur des données quantitatives. C'est dans une situation bien spécifique et lorsque des critères précis sont remplis que les management actions s'opèrent. Ils présentent donc des limites et ne peuvent pas être mis en place pour des décisions de l'ordre du subjectif, qui s'appliquent à partir de données qualitatives pouvant difficilement être transcrites en un algorithme simplifié.

2. Le rôle des management actions dans l'ORSA

L'évaluation prospective réalisée dans le cadre de l'ORSA doit tenir compte de la politique stratégique de l'entreprise et de son appétence au risque. La projection de la situation de l'entreprise

doit intégrer les ajustements que les dirigeants réaliseraient si la situation de l'entreprise évoluait. Dans le cadre d'un dispositif et d'une politique de gestion des risques, l'assureur est amené à identifier les risques, à les quantifier et à les gérer.

Par conséquent, la prise en compte dans le modèle de projection des flux de cette capacité d'action de l'assureur est indispensable. Cela détermine la pertinence et le réalisme des résultats produits et ce d'autant plus que les leviers d'actions ont des conséquences à long terme. Une prise en compte insuffisante de ces leviers d'actions peut conduire à des résultats irréalistes et à des montants de besoin de capital incohérents.

L'intégration des management actions est donc un élément essentiel dans le cadre de l'évaluation demandée par l'ORSA et plus particulièrement pour l'évaluation prospective du besoin global de solvabilité. Cela permet de modéliser au plus juste l'évolution future du profil de risque de l'assureur et son adaptation aux nouvelles conditions de marché telle que définie au travers de la politique de gestion des risques.

3. La mise en place des management actions dans l'ORSA

Les nombreux management actions pouvant être implémentés représentent une source d'enrichissement très importante pour les modèles ORSA. Cela nécessite cependant de prioriser les management actions à modéliser. Ils n'ont pas tous le même impact sur le business plan de l'entreprise et sur la politique stratégique et il n'est pas utile de surcharger le modèle, au risque d'introduire des biais. La mise en place des management actions engage également une implication déterminante du top management.

L'anticipation des management actions demande un travail de l'organe de direction, afin de déterminer les actions à mener dans les différentes situations économiques possibles. Le top management fixe les management actions en précisant leur règle de déclenchement et leur calibrage. La règle de déclenchement peut être en fonction du franchissement d'un seuil ou continue et en fonction d'un ou de plusieurs indicateurs de risque. Le déclenchement d'un management action peut également être conditionné aux déclenchements d'autres management actions afin d'éviter leur cumul. Le calibrage doit être proportionné avec les éléments mis en œuvre en cas de réalisation effective du management action dans le futur. Il doit être réaliste et adapté à ce qui sera réellement déployé.

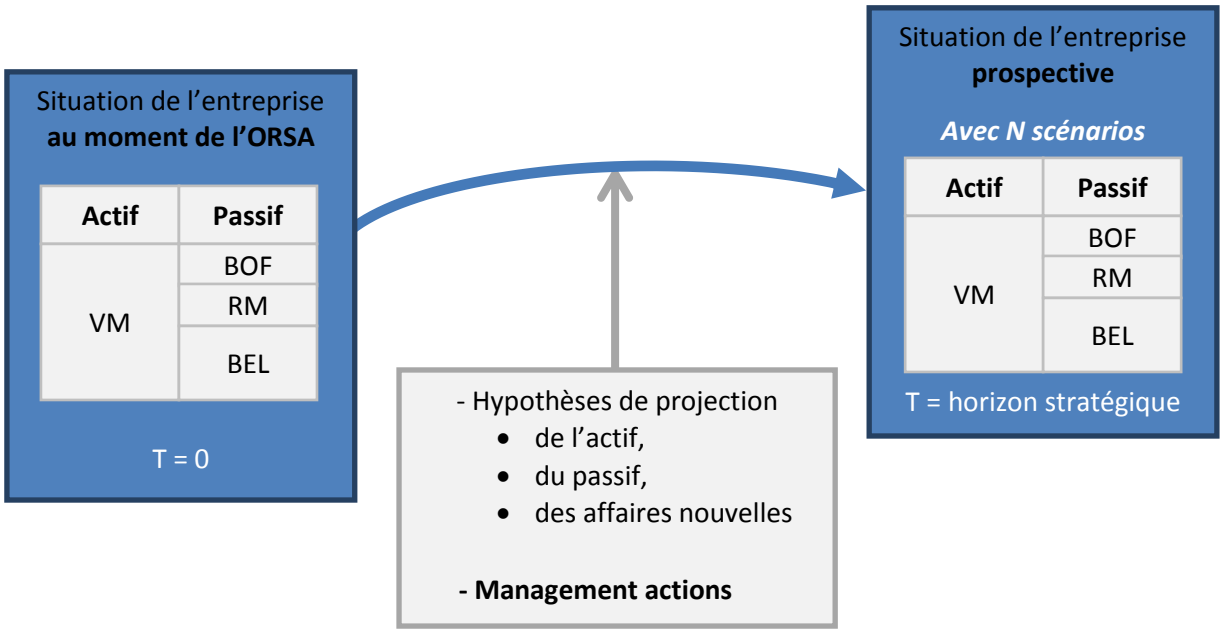


Figure 4 - Les management actions dans l'ORSA

La détermination des management actions doit être sans cesse enrichie au fur et à mesure des observations du risque et des évolutions de la politique stratégique. Le top management prend part à l'ORSA en déterminant les risques à suivre et les management actions à implémenter. En parallèle, les équipes opérationnelles ont pour objectif de suivre les risques identifiés, en communiquant à l'organe de direction des rapports détaillés mettant en lumière les leviers de pilotage à disposition. Les échanges entre le top management et les opérationnels vont donc permettre d'enrichir le sujet et contribuer à son amélioration au fil du temps.

Le dispositif de gestion des risques doit permettre de piloter efficacement l'entreprise. Dans ce but, les modèles utilisés doivent favoriser la souplesse d'utilisation et la réactivité de mise à jour. La souplesse est demandée afin de pouvoir implémenter facilement de nouveaux risques ou de nouveaux produits, ainsi que de nouveaux management actions ou de nouveaux dispositifs de couverture. La réactivité de mise à jour est demandée afin de pouvoir effectuer facilement des tests de sensibilités ou d'analyser des scénarios qui n'étaient jusqu'à présent pas réalisés.

Nous allons maintenant nous pencher sur l'apport de la logique floue. Pour cela nous allons dans la prochaine partie exposer le résultat de nos recherches et poser les fondements de la théorie de la logique floue.

Partie 2 : La logique floue, un concept adapté aux exigences de Solvabilité II

La logique floue propose un environnement mathématique complet, qui permet d'intégrer des données imparfaites dans un processus de décision. Nous allons présenter les différents outils indispensables à la bonne compréhension de ce concept. Ils seront ensuite utilisés dans une des principales applications de la logique floue : la commande floue. Cela nous permettra de voir en détails l'apport de la logique floue à la gestion des risques. Cette partie s'inspire de différents travaux réalisés par des chercheurs tels que Lofti Zadeh, Sanchez, Gomez, Shapiro, ou encore Bouchon-Meunier.

Chapitre 1 : Introduction à la logique floue

1. Un peu d'histoire

Les Grecs furent les premiers à s'intéresser à la logique mathématique durant l'Antiquité. Ils ont ainsi énoncé le principe de bivalence (toute proposition est soit vraie soit fausse) et la loi de non contradiction (une proposition ne peut être vraie et fausse en même temps). Dès le 17ème siècle, l'incertain a été abordé avec le développement de la notion de probabilité.

Toutefois, cette dernière ne permet pas de résoudre le problème posé par les connaissances imprécises ou les possibles contradictions dans les propositions. Lukasiewicz développe alors le principe de Valence au 20ème siècle. Selon ce principe, il existe plusieurs valeurs de vérité et non plus les deux seuls valeurs binaires. Lofti Zadeh, un scientifique de réputation internationale, applique 30 ans plus tard le principe de Lukasiewicz à chaque élément d'un ensemble et crée ainsi une algèbre complète pour les ensembles flous. Il introduit véritablement les bases de la logique floue lorsqu'il publie en 1965 un article intitulé « *Fuzzy sets* » (Ensembles flous). Cet article expose les prémisses de la théorie des sous-ensembles flous.

Dans les années 70, les ensembles flous ont été enrichis de nombreux principes méthodologiques. En 1978 notamment, la théorie des possibilités est introduite afin de traiter des concepts d'imprécision mais aussi d'incertitude. Les ensembles flous ont été développés il y a plus de 40 ans mais n'ont abouti à des applications industrielles notables que depuis une vingtaine d'années grâce à ces avancées. Le Japon a été l'un des précurseurs dans le domaine.

La logique floue peut être abordée comme une approche concurrente et complémentaire à la théorie des probabilités, avec un nouveau champ de recherche : les connaissances imparfaites.

A ses débuts, la logique floue n'intéresse que certains scientifiques de par sa nouveauté. Elle s'est ensuite démocratisée et est aujourd'hui appliquée dans de nombreux domaines, notamment :

- aux systèmes à réseaux de neurones et à l'intelligence artificielle ;
- en industrie (modélisation de la plasticité d'un béton dans un malaxeur industriel, régulation des niveaux dans les silos ou encore optimisation de la ventilation d'un élevage porcin) ;
- en médecine (travaux sur la délimitation de tumeurs en imagerie ou encore la segmentation des globules rouges) ;
- en gestion territoriale (cartographie d'espace).

Cet essor est en grande partie dû à l'intérêt des Japonais pour ce nouveau concept. Une vague de produits utilisant cette technique est en effet apparue au Japon, comme certains appareils électroménagers (machines à laver intelligentes, cuiseurs de riz) ou encore pour le contrôle du métro de Sendai en 1987.

La mise en œuvre de la logique floue est facilitée par des outils de développement toujours plus puissants. Les ordinateurs se retrouvent en quelque sorte dotés de facultés proprement humaines

par le biais des outils mathématiques flous. Le concept et les principes clés de ces outils sont exposés par la suite.

2. Le concept général de la logique floue

Les humains ont la capacité de réfléchir par eux-mêmes, ils prennent leurs décisions en fonction de ce qu'ils voient et d'un raisonnement qui leur est propre. Ainsi, leurs pensées ne peuvent pas entrer dans la logique habituellement utilisée par les outils informatiques, à savoir la logique binaire. Pour capturer toutes les imprécisions inhérentes à la pensée humaine, certains scientifiques tels que le professeur Zadeh ont développé à l'aide de nombreux outils mathématiques une nouvelle logique : la logique floue.

La modélisation d'un système flou prenant en compte la pensée humaine est complexe et elle doit gérer un ensemble de connaissances imparfaites. Cette perte d'information peut être due à des imprécisions ou des incertitudes lors de l'étape d'observation ou encore à une absence de rigueur pendant la modélisation.

Ces imperfections peuvent être de natures différentes, dont voici les trois principales :

- **L'incertitude** : il existe un doute sur la validité d'une connaissance, cela peut venir d'un manque de fiabilité par rapport à l'intermédiaire ou en cas de prévisions. Par exemple, dans la proposition « le comptable croit que la société va réaliser des bénéfices », l'intermédiaire n'est pas sûr de la validité de son raisonnement.
- **L'imprécision** : cette notion fait référence à la description incomplète d'un état de la réalité par une proposition. Ainsi, dans la phrase « le taux de marge de cette société est important », l'imprécision porte sur l'appréciation de l'observation, ou encore dans la proposition « le taux de marge de cette société est d'environ 20% », la mesure « d'environ 20% » entraîne une imprécision quant à la valeur prise par la mesure.
- **L'incomplétude** : l'impossibilité d'obtenir certains renseignements entraîne une absence de connaissance. La phrase « la majorité des sociétés de ce secteur réalisent des marges d'environ 20% » illustre bien le problème d'incomplétude, puisque la société en question ne fait pas forcément partie de la majorité.

En logique classique, ces imperfections dans les connaissances impliquent l'élimination des données, tandis que la logique floue va permettre de les traiter et ainsi de conserver les informations qu'elles contiennent. Même si le but est d'avoir une représentation la plus simple possible, il faut trouver le juste milieu entre conserver les connaissances imparfaites pour leurs informations supplémentaires et ne pas trop complexifier le modèle pour une meilleure manipulation.

La logique floue s'inspirant du raisonnement humain, les variables du modèle ne peuvent donc pas être représentées par les simples variables booléennes 0 et 1. Par exemple, il n'est pas aisé de qualifier comme grand ou petit un homme qui mesure 1m70. C'est pourquoi, dans le cadre de la logique floue, est utilisée une notion d'appartenance d'une proposition à un ensemble, par le biais d'une fonction qui peut prendre toutes les valeurs entre 0 et 1. Nous parlons de « fonction

d'appartenance ». Une variable peut ainsi appartenir à plusieurs ensembles et n'est pas nécessairement élément d'un seul et unique ensemble.

En continuant notre exemple sur la modélisation de la taille d'un homme, nous pouvons introduire trois différentes catégories (« petit », « moyen » et « grand ») de sorte que l'homme d'1m63 sera caractérisé par un degré d'appartenance de 75% à la classe « petit », de 25% à la classe « moyen » et de 0% à la classe « grand » par exemple.

Ces fonctions d'appartenance représentent le concept à la base des différentes théories exposées tout au long de ce chapitre.

3. La théorie des sous-ensembles flous

La théorie des sous-ensembles flous répond au besoin de représenter des connaissances imprécises dues soit à un manque de précision de l'observateur qui s'exprime en langage naturel, soit à des erreurs de mesures de l'instrument d'observation. Ce concept de sous-ensemble flou constitue une extension des sous-ensembles d'un ensemble donné avec certaines caractéristiques présentées ci-dessous.

3.1. Sous-ensembles flous

a) Définition d'un sous-ensemble flou

Prenons un ensemble de référence U. Les éléments de U qui possèdent une même propriété constituent, d'après la théorie des ensembles, un même sous-ensemble classique A de U. Ainsi, l'élément qui n'est pas caractérisé par la propriété va appartenir au sous-ensemble complémentaire de A.

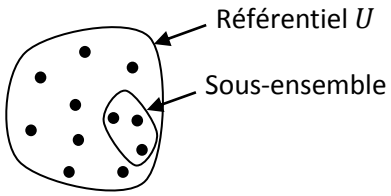


Figure 5 - Sous-ensemble classique de U

Toutefois, dans certaines situations, un élément de U peut satisfaire la propriété seulement en partie, comme dans l'expression « il fait plutôt chaud aujourd'hui ». L'orateur ne décide pas de caractériser le temps en choisissant entre la situation « chaude » ou « froide » mais en modulant ses propos. Cette expression va pouvoir être traitée en indiquant avec quel degré elle appartient à un sous-ensemble de U. Pour ce faire, en 1965, Zadeh introduit la notion de sous-ensemble flou. Ainsi, tout élément de U appartient à un sous-ensemble flou avec un degré d'appartenance. Ce degré d'appartenance peut-être égal à 1 en cas d'appartenance absolue.

b) Fonction d'appartenance

Pour déterminer le degré d'appartenance d'un élément à un sous-ensemble donné, nous introduisons la notion de fonction d'appartenance, notée en général $\mu_A(u)$. L'indice A correspond au sous-ensemble flou étudié et l'argument u se rapporte à l'élément de U.

A tout élément $u \in U$, nous associons la valeur $\mu_A(u)$ telle que $\mu_A : U \rightarrow [\![0,1]\!]$

Cette fonction d'appartenance peut prendre différentes formes, les plus souvent utilisées étant celles dites « régulières », c'est-à-dire sans ruptures brusques, représentant bien leur caractère graduel et le passage progressif de la non-satisfaction de la propriété à laquelle elles sont associées à sa satisfaction.

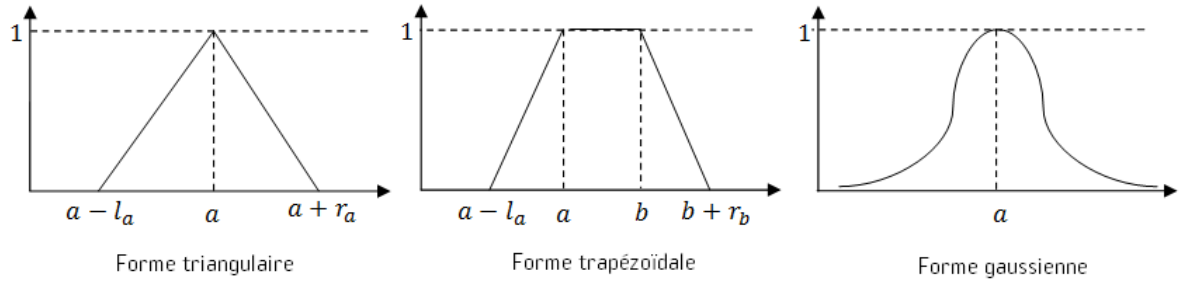


Figure 6 - Fonctions d'appartenance régulières

Ces fonctions d'appartenance aident à la représentation de nombres flous, qui correspondent à des valeurs réelles connues imprécisément. Pour illustrer ces nombres flous, nous pouvons utiliser des intervalles flous caractérisant les intervalles de l'ensemble des réels dont les limites sont imprécises.

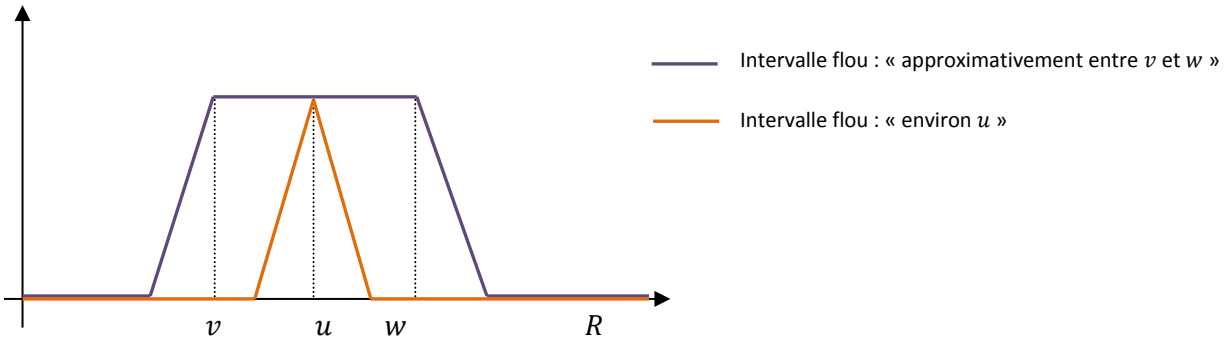


Figure 7 - Intervalles flous

Si nous prenons un nombre flou triangulaire $\tilde{A} = (a, l_a, r_a)$ de centre a, d'étendue à gauche l_a et à droite r_a, sa fonction d'appartenance aura la forme suivante :

$$\mu_A = \begin{cases} \dfrac{(u - a + l_a)}{l_a}, & si\ a - l_a < u \leq a \\ \dfrac{(a + r_a - u)}{r_a}, & si\ a < u \leq a + r_a \\ 0, & sinon \end{cases}$$

Cela donne le graphique suivant :

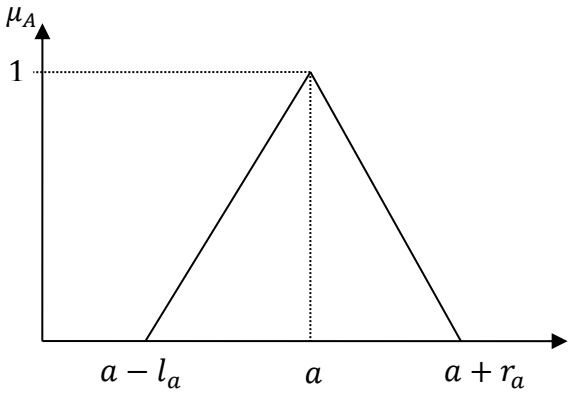


Figure 8 - Fonction d'appartenance triangulaire

Dans le cas où les fonctions d'appartenance considérées prennent des valeurs binaires (0 ou 1), cette théorie correspond à la théorie des sous-ensembles classiques.

c) Caractéristiques d'un sous-ensemble flou

Les ensembles flous diffèrent des ensembles classiques par le biais de quatre principales caractéristiques :

- **Le support** : il correspond à l'ensemble des éléments de U appartenant au moins un peu au sous-ensemble A. Il est noté $supp(A)$ et se formule de la façon suivante :

$$supp(A) = \{u \in U / \mu_A(u) \neq O\}$$

- **La hauteur** : il s'agit du plus fort degré avec lequel un élément de U appartient à A, s'exprimant :

$$h(A) = sup_{u \in U}\, \mu_A(u)$$

- **Le noyau** : il est noté $noy(A)$ et correspond à l'ensemble des éléments de U appartenant de façon absolue au sous-ensemble flou A. Autrement dit, il s'agit de tous les éléments pour lesquels la fonction d'appartenance de A vaut 1 :

$$noy(A) = \{u \in U / \mu_A(u) = 1\}$$

- **La cardinalité** : elle correspond au degré global avec lequel les éléments de U appartiennent à A, et se formule :

$$|A| = \sum_{u \in U} \mu_A(u)$$

On peut illustrer les trois premières caractéristiques à l'aide du graphique suivant :

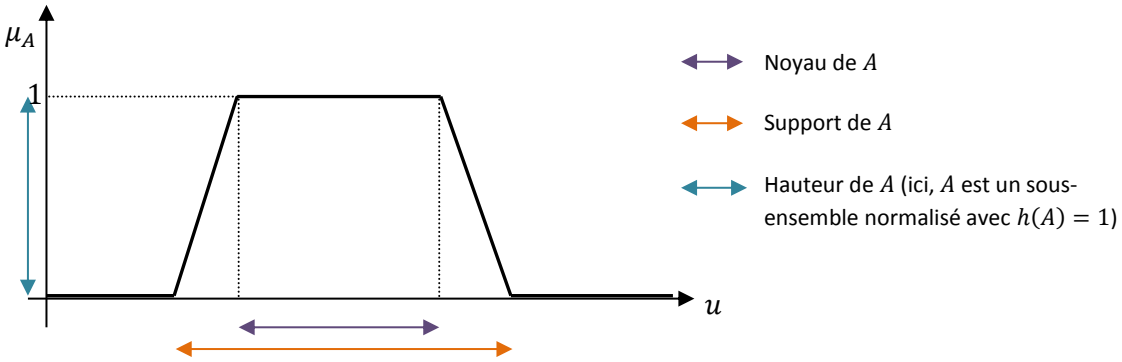


Figure 9 - Caractéristiques d'un ensemble flou

3.2. Opérations sur les sous-ensembles flous

Les opérations sur les sous-ensembles flous s'inspirent des opérations mathématiques classiques et ont pour objectif de gérer des combinaisons logiques entre des notions floues, telles que la satisfaction simultanée de deux propositions.

Si A et B sont deux sous-ensembles flous de U et $\mu_A(u)$ et $\mu_B(u)$ leurs fonctions d'appartenance, nous pouvons définir cinq opérations :

a) Egalité

Deux sous-ensembles flous A et B de U sont égaux si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur pour tout élément de U :

$$A = B \ \ ssi \quad \forall u \in U, \ \mu_A(u) \ = \mu_B(u)$$

b) Inclusion

Etant donné deux sous-ensembles flous A et B de U, l'ensemble A est inclus dans l'ensemble B, ($A \subseteq B$), si leurs fonctions d'appartenance sont telles que :

$$\forall u \in U, \ \mu_A(u) \ \leq \mu_B(u)$$

c) Intersection

L'intersection de deux sous-ensembles A et B de U correspond à l'opérateur logique ET, notée $A \cap B$ telle que :

$$\forall u \in U, \ \mu_{A \cap B}(u) = min(\mu_A(u), \mu_B(u)),$$

Où min(,) désigne l'opérateur de minimisation.

Reprenons l'exemple de la taille d'un homme avec trois catégories « petit », « moyen » et « grand ». Le graphique qui suit représente les fonctions d'appartenance :

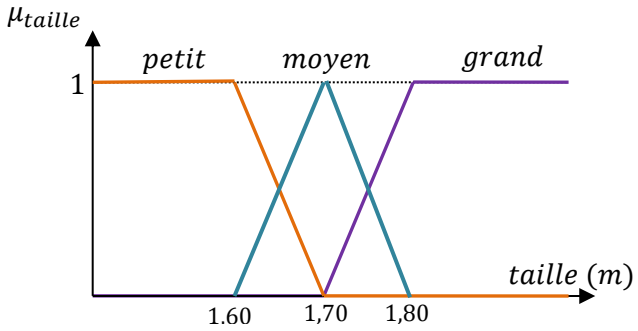


Figure 10 - Ensembles flous liés à la taille d'un homme

L'intersection des deux propositions « personne de petite taille » et « personne de taille moyenne » s'illustre donc ainsi :

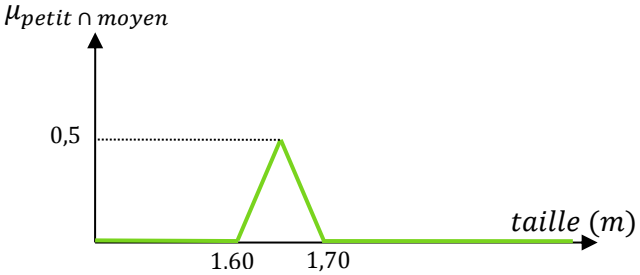


Figure 11 - Intersection des sous-ensembles « petit » et « moyen »

d) Union

L'union de deux sous-ensembles A et B de U correspond à l'opérateur logique OU, notée $A \cup B$ telle que :

$$\forall u \in U,\ \mu_{A \cup B}(u) = max(\mu_A(u), \mu_B(u)),$$

Où max(,) désigne l'opérateur de maximisation.

D'après l'exemple précédent, l'union des propositions « personne de petite taille » et « personne de taille moyenne » se représente de la façon suivante :

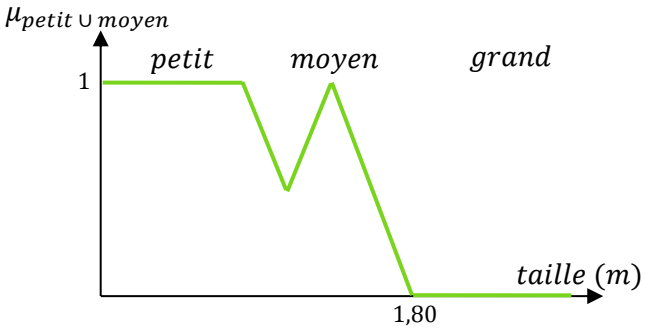


Figure 12 - Union des sous-ensembles « petit » et « moyen »

Ces deux opérateurs de minimisation et de maximisation sont les plus utilisés en raisonnement flou, mais il en existe d'autres, exposés plus en détails dans le paragraphe 3.3.

e) Propriétés de l'union et de l'intersection

Ces deux opérateurs logiques vérifient :

- L'associativité : $(A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C \ \ et \ \ A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C)$
- La commutativité : $A \cap B = B \cap A \ \ et \ \ A \cup B = B \cup A$

Comme dans la théorie des ensembles classiques, l'union et l'intersection possèdent également les propriétés suivantes, pour tous A et B de U :

- $A \cap U = A, A \cap \emptyset = \emptyset$,
- $A \cup \emptyset = A, A \cup U = U$,
- $A \cup B \supseteq A \supseteq A \cap B$,
- $A \cap (B' \cup B'') = (A \cap B') \cup (A \cap B'')$,
- $A \cup (B' \cap B'') = (A \cup B') \cap (A \cup B'')$,
- $|A| + |B| = |A \cap B| + |A \cup B|$.

f) Complément

Le complément A^C d'un sous-ensemble flou A de U est tel qu'un élément u de U appartient d'autant plus à A^C qu'il appartient peu à A. Ce complément A^C est défini comme le sous-ensemble flou de U, de fonction d'appartenance :

$$\forall u \in U, \ \mu_{A^C}(u) = 1 - \mu_A(u)$$

Ainsi, avec l'exemple, la fonction d'appartenance des personnes « non petites » serait :

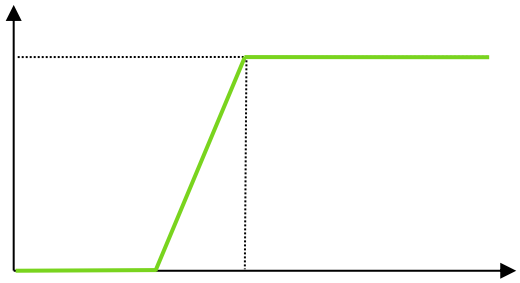


Figure 13 -Complémentaire du sous-ensemble « petit »

3.3. Normes et conormes

Les opérateurs ci-dessus d'égalité, d'union et de complémentation caractérisés par la minimisation, la maximisation et le complément peuvent être remplacés par d'autres opérateurs, appelés normes et conormes.

a) t-normes

Toute t-norme peut servir à définir l'intersection de sous-ensembles flous. Ces t-normes T sont les fonctions de $[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ vérifiant pour tout a, b, c et d de $[0,1]$:

- La commutativité : $T(a,b) = T(b,a)$
- L'associativité : $T(a, T(b,c)) = T(T(a,b), c)$
- L'isotonie : $si\ a \leq c\ et\ b \leq d\ alors\ T(a,b) \leq T(c,d)$
- L'élément neutre 1 : $T(a,1) = a$

Les plus connus sont :

$T_0(a,b) = \begin{cases} min(a,b) & si\ max(a,b) = 1 \\ 0 & sinon \end{cases}$	(produit drastique de Weber)
$T_1(a,b) = max(0, a+b-1)$	(Lukasiewicz)
$T_{1,5}(a,b) = ab/(2-a-b+ab)$	(Einstein)
$T_2(a,b) = ab$	(algébrique ou probabiliste)
$T_{2,5}(a,b) = ab/(a+b-ab)$	(Hamacher)
$T_3(a,b) = min(a,b)$	(Zadeh)

Figure 14 - Liste de t-normes connues

Avec $T_0 \leq T_1 \leq \cdots \leq T_3$, l'opérateur de minimisation de Zadeh est donc la plus grande des t-normes.

b) t-conormes

Toute t-conorme peut servir à définir l'union de deux ensembles flous. Elles sont les fonctions S de $[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ vérifiant de même la commutativité, l'associativité, l'isotonie mais avec l'élément neutre 0, c'est-à-dire que $S(a,0) = a$. Les conormes les plus utilisées sont les suivantes :

$S_0(a,b) = \begin{cases} max(a,b) & si\ min(a,b) = 0 \\ 1 & sinon \end{cases}$	(Weber)
$S_1(a,b) = min(1, a+b)$	(Lukasiewicz)
$S_{1,5}(a,b) = (a+b)/(1+ab)$	(Einstein)
$S_2(a,b) = a + b - ab$	(probabiliste)
$S_{2,5}(a,b) = (a+b-2ab/(1-ab)$	(Hamacher)
$S_3(a,b) = max(a,b)$	(Zadeh)

Figure 15 - Liste de t-conormes connues

Nous pouvons alors vérifier que $S_3 \leq S_{2,5} \leq \cdots \leq S_0$; ainsi l'opérateur de maximisation de Zadeh est la plus petite des conormes.

Nous pouvons ensuite nous intéresser à la robustesse de ces normes et conormes.

Par exemple, pour une norme $T(x)$ de $[0,1]^2 \rightarrow [0,1]$, nous pouvons définir le risque en δ de la norme $T(x)$ par : $\Delta_f(\delta) = sup\{\|T(x) - T(y)\| \ / \ |x-y| < \delta\}$.

Il en ressort que les normes et conormes les moins sensibles sont celles de Zadeh, également les plus utilisées actuellement dans le monde de la logique floue.

3.4. Principe d'extension de Zadeh

En 1975, Zadeh introduit un nouveau principe dans le cadre de la théorie des ensembles flous. Ce principe permet de mieux prendre en compte les relations entre deux sous-ensembles flous, lorsque les données sont imparfaites.

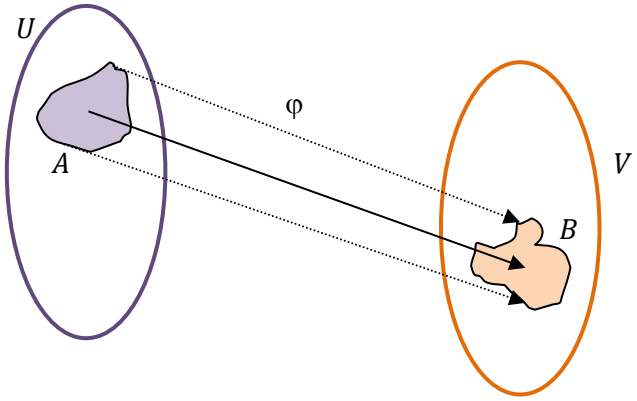


Figure 16 - Principe d'extension de Zadeh

L'objectif du principe d'extension est de trouver une application pouvant relier les deux sous-ensembles flous A et B de U et V.

Etant donné un sous-ensemble flou A de U et une application φ de U vers V, le principe d'extension permet de définir un sous-ensemble B de V associé à A par l'intermédiaire de φ :

$$\forall v \in V \begin{cases} \mu_B(v) = sup_{\{u \in U \,/ v=\varphi(u)\}} \mu_A(u) & si\ \varphi^{-1}(\{v\}) \neq \emptyset \\ \mu_B(v) = 0 & si\ \varphi^{-1}(\{v\}) = \emptyset \end{cases}$$

Pour illustrer ce principe, nous représentons dans un premier temps un graphique montrant l'image B du sous-ensemble ordinaire A de U par l'application $\varphi(u)$.

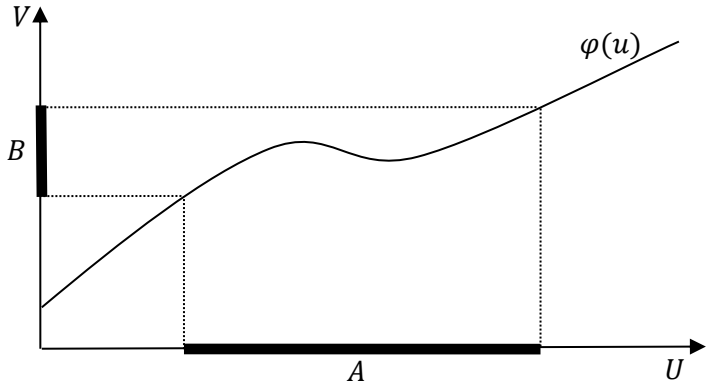


Figure 17 - Image d'un sous-ensemble ordinaire

Ce deuxième graphique montre l'intérêt du principe d'extension, à savoir la possibilité de trouver une image « floue » à partir d'un sous-ensemble flou :

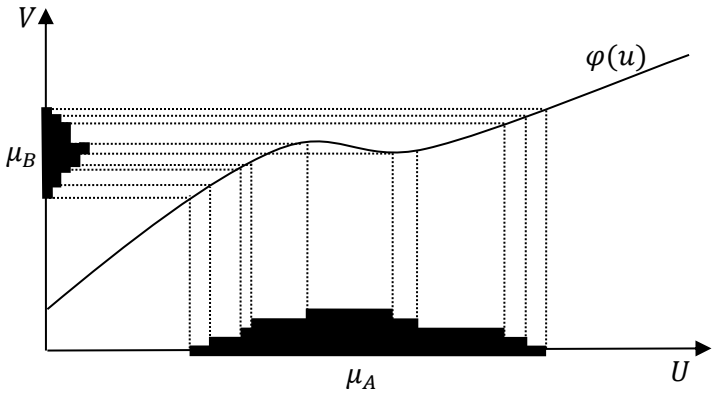


Figure 18 - Image floue d'un sous-ensemble flou

Pour une meilleure compréhension, prenons un exemple. Considérons l'ensemble U des couleurs de cheveux $\{brun, châtain, blond, roux\}$ que nous pouvons associer à l'ensemble Y des types de populations $\{méridional, nordique, autre\}$ par l'application φ. Ainsi, nous avons :

$$\varphi(brun) = méridional,$$

$$\varphi(châtain) = autre,$$

$$\varphi(blond) = \varphi(roux) = nordique.$$

Cependant, une personne peut être « plutôt brune avec des reflets châtains ». Elle sera donc représentée par le sous-ensemble A' tel que :

$$A' = 0.9/brun + 0.2/châtain + 0/blond + 0/roux$$

Le sous-ensemble image B' correspondant au type de population sera caractérisé de la manière suivante :

$$\begin{cases} \mu_{B'}(méridional) = \mu_{A'}(brun) = \ 0{,}9 \\ \mu_{B'}(nordique) = sup\,(\mu_{A'}(blond),\ \mu_{A'}(roux)) = 0 \\ \mu_{B'}(autre) = \mu_{A'}(châtain) = 0{,}2 \end{cases}$$

Ainsi, une personne « plutôt brune avec des reflets châtains » va vraisemblablement être de type « méridional » sans toutefois exclure la possibilité qu'elle soit de type « autre ».

Ce principe est un des plus importants dans la théorie des sous-ensembles flous, puisqu'il sert pour l'une des principales applications de la logique floue : la commande floue (exposée dans le chapitre 2).

4. Le raisonnement approximatif

Les théories précédentes fournissent des moyens de représenter des propositions imprécises. Ces dernières peuvent devenir ce que l'on appelle des prémisses à un raisonnement, permettant d'aboutir ensuite à une conclusion par l'application d'opérateurs et d'implications. Encore faut-il pour cela assouplir les règles de déduction de la logique classique. C'est tout le but du raisonnement approximatif.

Les premières tentatives ont consisté en la proposition de nouvelles tables de vérité pour des valeurs intermédiaires (0, 1/2, 1) :

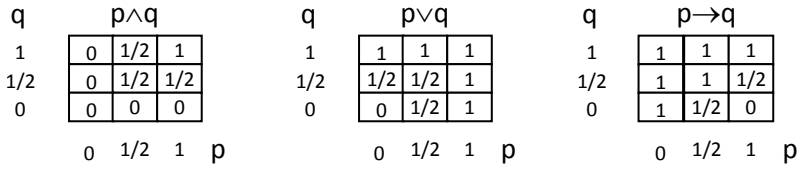


Figure 19 - Tables de vérité en logique trivaluée

Les logiques trivaluées ou avec un nombre supérieur mais fini de valeurs, ont été appliquées à des problèmes concrets, y compris grâce à des seuils, pour des circuits électroniques.

Cependant, elles s'avèrent encore insuffisantes pour manipuler des connaissances imparfaites. Les opérations d'intersection ou d'union habituellement employées peuvent être remplacées par d'autres opérations construites par exemple dans le cadre de la logique floue à l'aide d'opérateurs du maximum ou du minimum : $p \wedge q = min(p, q)$ et $p \vee q = max(p, q)$.

Pour généraliser l'implication, nous pouvons utiliser la règle de décision dite le modus ponens généralisé. Par exemple, nous avons :

$$(X\ est\ A) \rightarrow (Y\ est\ B)$$ où A et B sont des relations floues unaires.

Ainsi, pour A' ayant une fonction d'appartenance « proche » de A, avec la proposition $(X\ est\ A')$ nous pouvons en déduire la proposition $(Y\ est\ B')$ avec B' construit comme « voisin » de B.

Pour une norme T et un opérateur d'implication défini par $\pi(x, y) = (\mu_A(x) \rightarrow \mu_B(x))$, la définition donnée par Zadeh est :

$$\mu_{B'}(x) = sup_{x \in supp(A')}(T(\mu_{A'}(x), \mu_A(x) \rightarrow \mu_B(x)).$$

Nous venons de présenter les notions principales de la logique floue dans le but d'analyser des données imparfaites. La théorie des sous-ensembles flous a fourni des outils simples et bien adaptés à la représentation d'informations imprécises. Nous n'avons pas développé la manipulation des données incertaines et incomplètes puisqu'elles ne font pas l'objet de ce mémoire. Mais pour plus de détails, des travaux existent sur la théorie des possibilités qui vient en remplacement de la théorie des probabilités et qui permet de traiter ces données incertaines et incomplètes (cf. les travaux menés par Lotfi Zadeh en 1978).

Dans la suite de ce mémoire, nous verrons comment les outils théoriques que nous avons présentés sont mis en œuvre pour analyser de façon cohérente des données imparfaites telles que la représentation du comportement humain. Pour ce faire, il est nécessaire d'exposer l'une des techniques les plus utilisées : la commande floue.

Chapitre 2 : La commande floue

Les applications pratiques de la logique floue sont nombreuses et diverses, la commande floue en est une des plus importantes. Un contrôleur flou se comporte comme un approximateur capable de calculer un résultat non-flou depuis plusieurs variables non-floues elles aussi, mais par le biais d'un processus de raisonnement flou. Cette application est facilement adaptable à des domaines divers et utile lorsque nous ne disposons pas de modèle mathématique efficace. Dès son développement par Mamdani dans les années 70, les réalisations industrielles n'ont pas tardé à apparaître dans les domaines de l'automatisme, de la robotique ou encore de l'intelligence artificielle. Nous pouvons citer par exemple la sélection automatique de programmes de machines à laver, le contrôle du cycle de cuisson de fours à micro-ondes, le contrôle de la vitesse et du régime du moteur de véhicules en virage ou en côte.

La mise en œuvre d'une commande floue utilise la théorie des sous-ensembles flous, développée dans le chapitre précédent, et fait apparaître trois grands modules : les entrées dans le système, la gestion des données à l'aide de règles, puis la sortie du système des variables. Elle consiste ainsi à remplacer les algorithmes de réglage conventionnels par des règles linguistiques du type : « *SI* la voiture qui précède est proche *ET* que je roule vite *ALORS* il faut freiner rapidement ». Nous obtenons donc un algorithme linguistique qui se prête mieux que les méthodes traditionnelles à la commande d'un processus. Pour mieux comprendre cette application de la logique floue, les aspects théoriques seront accompagnés d'un exemple illustratif tout au long de ce chapitre.

La commande floue est caractérisée par une structure en trois étapes expliquées plus en détails ci-dessous.

1. La première étape : la fuzzification

Le premier module traite les entrées du système. Nous procédons tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours (ou référentiels) que le système impose, et à la détermination des fonctions d'appartenance pour chacune de ces entrées. Nous appelons cette étape, permettant de transformer une entrée réelle en un sous-ensemble flou, la fuzzification. Ensuite nous déterminons la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système.

Exemple : « Cet homme mesure 1m625 » donc il est « petit » à un degré de 75% et « moyen » à 25%. La partition floue de l'univers du discours serait donc :

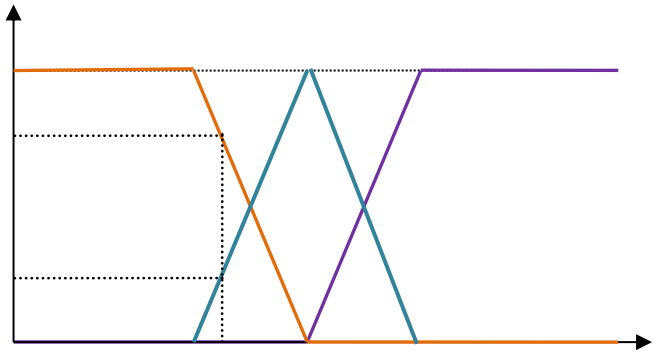


Figure 20 - Partition de l'univers liée à la taille d'un homme

En effet, la taille d'une valeur de 1m625 coupe les fonctions d'appartenance en :

- 75% pour la notion de « petit »,
- 25% pour la notion de « moyen »,
- 0% pour la notion de « grand ».

Pour mieux comprendre cette première étape, nous développons un exemple de prise de décision à l'aide de la commande floue.

Une personne va manger au restaurant, elle réfléchit alors au pourboire qu'elle compte donner au serveur. Son choix va se faire en fonction de la qualité de la nourriture et du service (qu'elle note sur 10). Le but est donc de trouver le montant approprié du pourboire (en pourcentage de l'addition), à l'aide de la logique floue. Pour cela, nous procédons à la fuzzification de nos variables.

Il y a trois variables linguistiques :

- Le service qui peut prendre comme valeurs « mauvais », « bon » et « excellent » et que nous caractérisons en ensembles flous par le biais de fonctions d'appartenance « gaussiennes » :

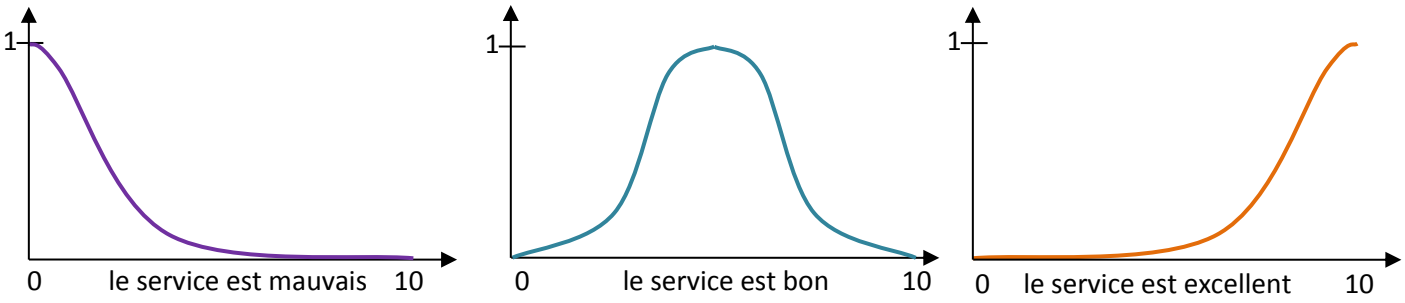


Figure 21 - Fuzzification de la variable « service »

- La nourriture qui peut prendre comme valeurs « rance » et « délicieuse » déterminées par les fonctions d'appartenance suivantes :

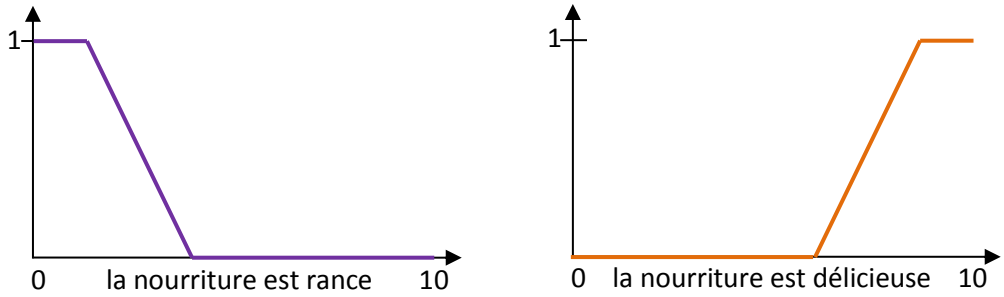


Figure 22 - Fuzzification de la variable « nourriture »

- Le pourboire qui peut prendre comme valeurs « petit », « moyen » et « généreux » sous la forme de fonctions d'appartenance triangulaires :

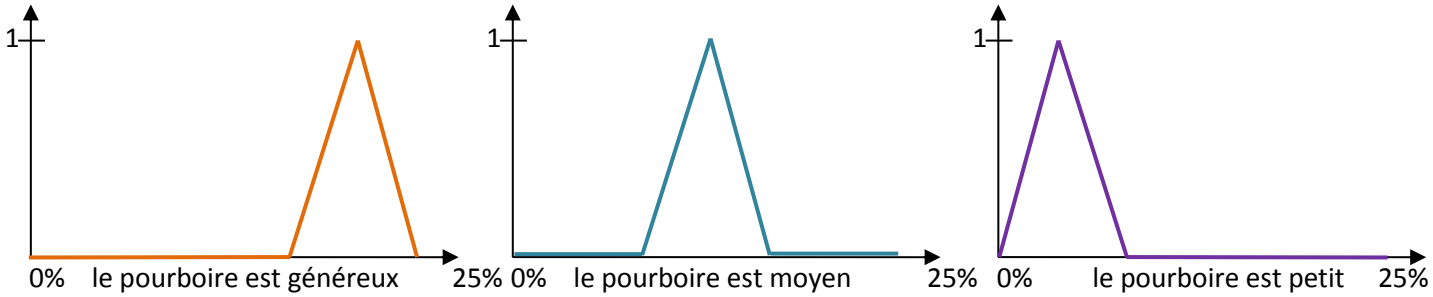


Figure 23 - Fuzzification de la variable « pourboire »

Les fonctions d'appartenance liées aux variables « service » et « nourriture » s'expriment avec une note pouvant aller de 0 à 10 et celle concernant le « pourboire » est fonction du pourcentage de la facture du repas (de 0 à 25%).

A l'aide de ces variables « floues », nous pouvons définir un ensemble de règles d'inférence qui vont conditionner le processus de contrôle. Pour notre exemple de prise de décision, nous trouvons les trois règles suivantes :

- SI le service est « mauvais » OU la nourriture est « rance » ALORS le pourboire est « petit »

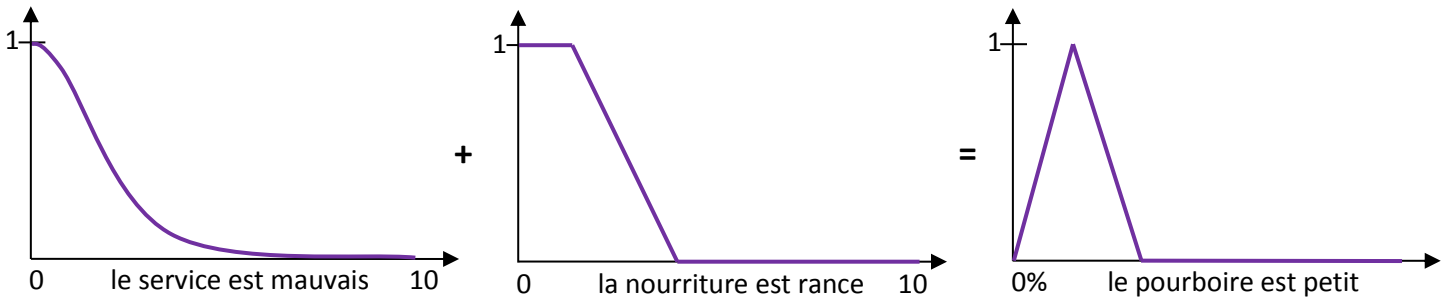


Figure 24 - Règle d'inférence 1

- SI le service est « bon » ALORS le pourboire est « moyen »

Figure 25 - Règle d'inférence 2

- SI le service est « excellent » OU la nourriture est « délicieuse » ALORS le pourboire est « généreux »

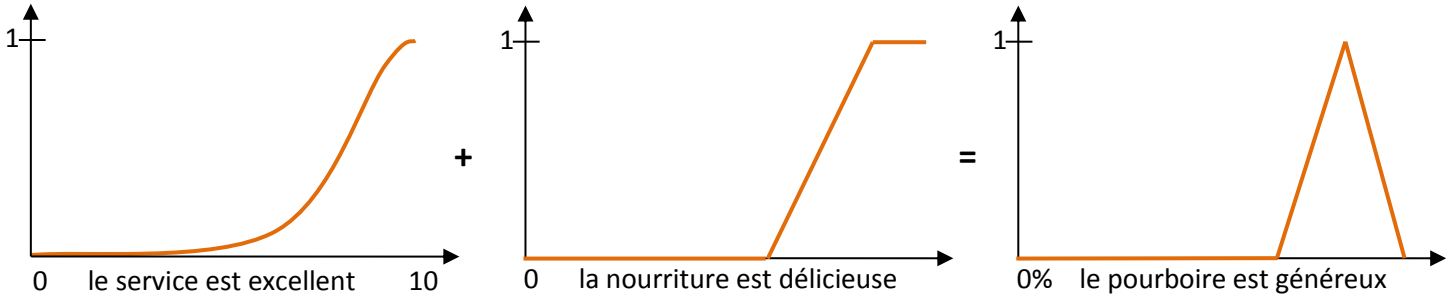


Figure 26 - Règle d'inférence 3

2. La deuxième étape : le mécanisme d'inférence

Le deuxième module consiste à utiliser les variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en appliquant les règles développées auparavant.

Une des mises en pratique d'inférence couramment utilisée est celle de Mamdani. Elle peut être décrite par l'enchaînement de 3 phases :

- L'agrégation : évaluation des conditions associées aux règles d'inférence, l'union étant caractérisée par l'opérateur de maximisation et l'intersection par la minimisation.
- L'activation : évaluation de chaque règle d'inférence, et application de la relation d'inférence de Mamdani.

$$\mu'_{conclusion}(y) = min(\mu_{prémisse}(x_i), \mu_{conclusion}(y)),$$

Avec $\mu_{prémisse}(x_i)$ le degré d'activation suite à l'agrégation des conditions avec les opérateurs de maximisation et de minimisation.

Cette étape d'activation peut également utiliser la méthode de Larsen qui, au lieu de tronquer les fonctions d'appartenance, va prendre une réduction de la fonction d'appartenance de conclusion en question proportionnellement au degré d'activation de la règle :

$$\mu'_{conclusion}(y) = \mu_{prémisse}(x_i) \times \mu_{conclusion}(y)$$

- L'agrégation des conclusions : obtention de la fonction d'appartenance finale à partir du maximum des fonctions d'appartenance pour chaque y.

$$\mu_{finale}(y) = max(\mu'_{conclusion}(y)).$$

Pour continuer notre exemple, les deux premières étapes d'agrégation et d'activation peuvent être illustrées à l'aide des graphiques suivants. Si notre client considère que le service n'était pas très bon, sur une échelle de notation de 0 à 10, la valeur d'entrée pourrait donc être de 3. En ce qui concerne la nourriture, le consommateur la trouve plutôt bonne, ce qui peut correspondre à une note d'entrée de 8 sur 10. Ainsi, à l'aide de ces informations d'entrées, nous pouvons en déduire la fonction d'appartenance de la conclusion sur le montant du pourboire pour chaque règle :

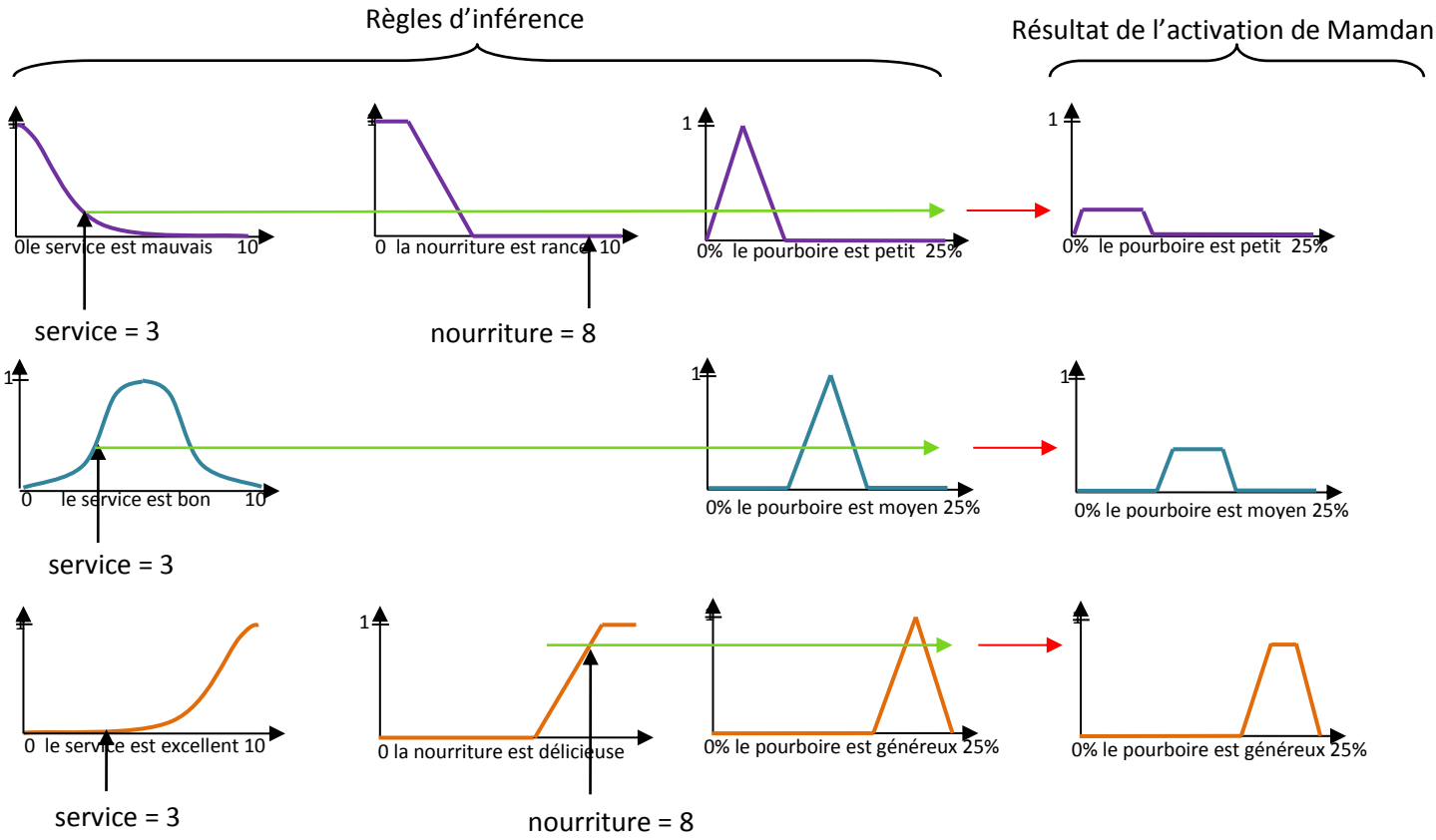


Figure 27 - Inférence de Mamdani : étapes de l'agrégation et de l'activation

La dernière étape d'agrégation des conclusions utilise le critère de maximisation, cela donne le μ_{finale} suivant :

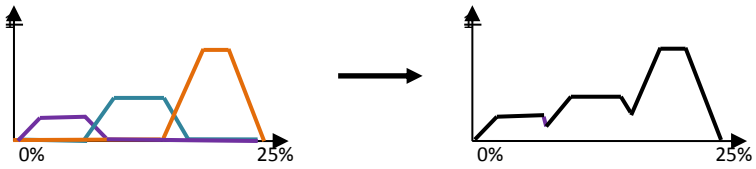


Figure 28 - Inférence de Mamdani : étape de l'agrégation des conclusions

3. La troisième étape : la défuzzification

Enfin, vient la défuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établie par le mécanisme d'inférence. Il existe quatre principales techniques de défuzzification :

- La méthode la plus simple et la plus approximative est de prendre en compte le premier maximum de la fonction μ_{finale} .
- La deuxième est de considérer la moyenne des maximums de la fonction (moyenne des valeurs de sortie les plus vraisemblables).
- La troisième méthode est l'extraction barycentrique de la valeur y_0, qui consiste à faire une moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leur degré d'appartenance. Cette méthode est encore peu coûteuse en calculs et donne de bons résultats.
- La dernière méthode, qui est de loin la plus utilisée, est celle qui consiste à prendre en compte le centre de gravité de la surface délimitée par la fonction d'appartenance.

Toujours en continuant sur notre exemple, l'étape de défuzzification à l'aide de ces méthodes nous donne quatre montants de pourboire différents:

- Avec la méthode du premier maximum :

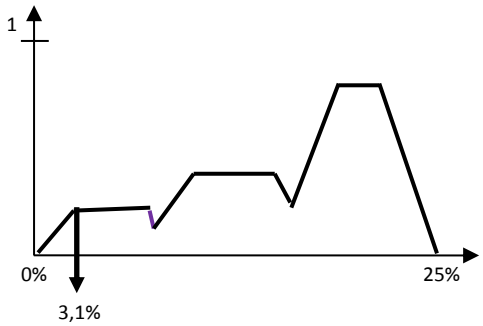


Figure 29 - Défuzzification : méthode du premier maximum

Le montant du pourboire correspondrait donc à 3,1% de la facture.

- Avec la méthode de la moyenne des maximums :

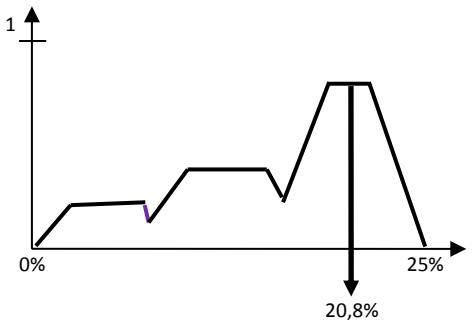


Figure 30 - Défuzzification : méthode de la moyenne des maximums

Le montant du pourboire serait ici de 20,8% de la facture.

- Avec la méthode de l'extraction barycentrique :

En calculant la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leur degré d'appartenance, le pourcentage de pourboire serait de 6,4% du montant de la facture.

- Avec la méthode du centre de gravité :

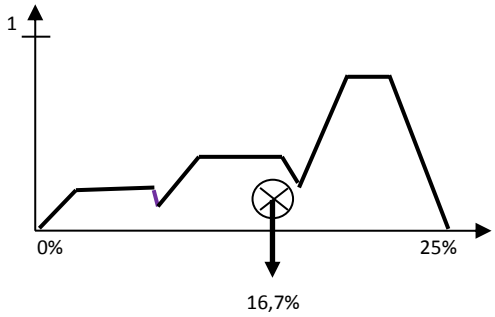


Figure 31 - Défuzzification : méthode du centre de gravité

Le pourboire aurait avec cette méthode un montant de 16,7% de la facture totale.

Ainsi, nous remarquons que le choix de la méthode est très important car le résultat qui en découle peut être très différent. Même si la dernière méthode demande un peu plus de calculs, elle paraît plus pertinente. Il s'agit de la méthode la plus souvent utilisée. De ce fait, dans notre exemple, nous pouvons en conclure que le client trouvant que le service n'était pas très bon mais que la nourriture était plutôt de qualité donnera un pourboire d'environ 17% du montant de la facture.

4. Conclusion

Pour résumer le mécanisme de la commande floue, nous pouvons établir le schéma suivant :

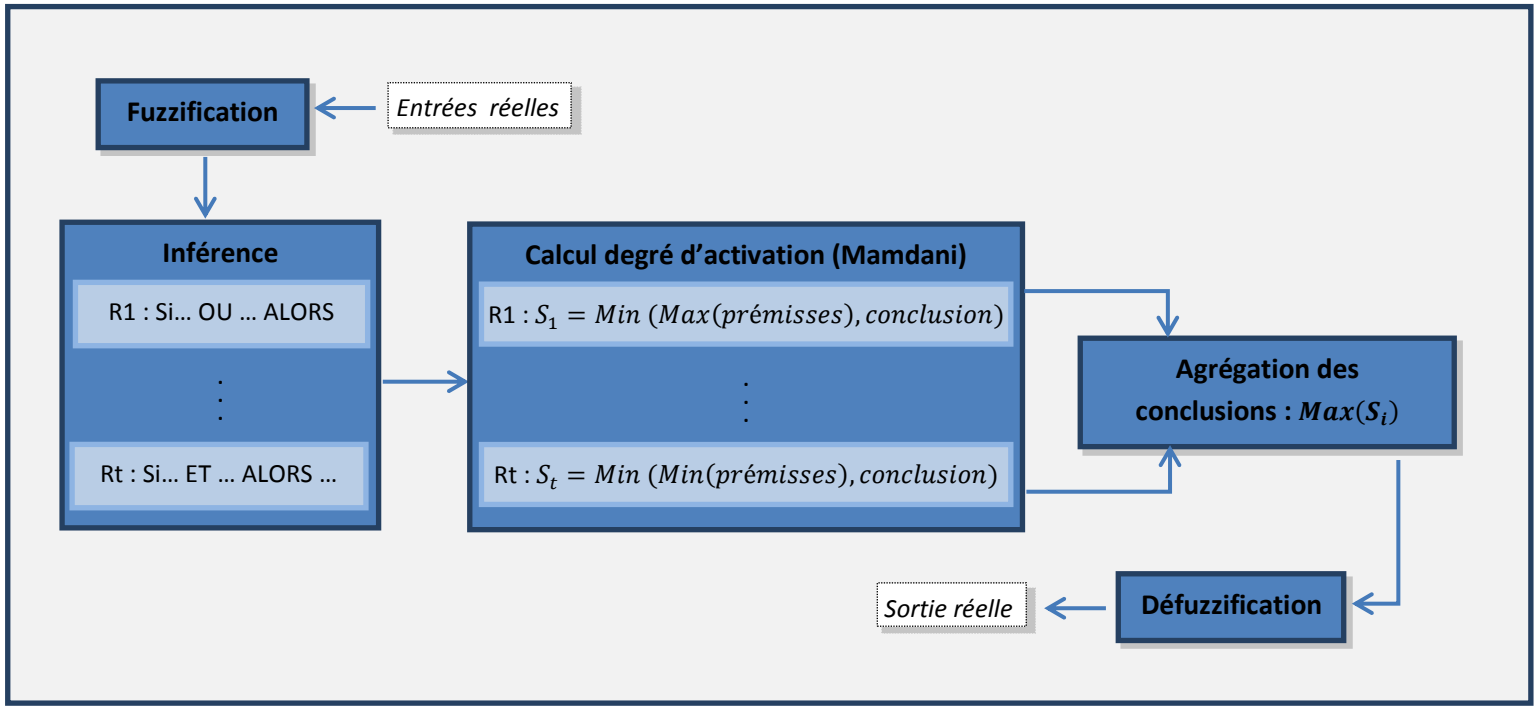


Figure 32 - Mécanisme de la commande floue

La commande floue est à ce jour l'un des domaines de la logique floue où il existe le plus de réalisations dans le monde réel. Cette méthode suit toujours le même schéma en trois étapes, à savoir, la fuzzification, l'inférence puis la défuzzification. Le mécanisme d'inférence utilise la plupart du temps l'agrégation de Mamdani, même s'il existe d'autres méthodes telles que la méthode de Larsen.

Cette technique de commande floue est souvent appréciée par les ingénieurs et chercheurs pour sa possible introduction de connaissances linguistiques à son système. Même si cela peut entraîner un manque de stabilité comme nous avons pu le voir lors du choix de la méthode de défuzzification, la commande floue est implicitement robuste parce que fondée sur l'expertise humaine. A tout moment, l'expert peut se permettre d'effectuer des modifications que ce soit dans les règles d'inférence ou les méthodes choisies.

Cependant, cette possibilité de pouvoir maîtriser un procédé à comportement complexe avec une conception simple ne garantit pas toujours la cohérence des inférences. En effet, certaines contradictions dans les règles peuvent apparaître. Même si de nombreuses études ont déjà montré l'efficacité de la commande floue, certains chercheurs ont préféré se tourner vers d'autres méthodes d'assimilation des imperfections telles que la régression floue.

Il s'agit d'une régression linéaire simple qui peut être généralisée, dans le cas où les variables ne sont plus numériques par exemple, en utilisant le concept de nombres flous pour la représentation des données imprécises. Le flou est porté soit par les paramètres de la régression, soit par les variables

explicatives, soit par les deux. Nous n'allons pas développer cette méthode qui ne nous sera pas utile par la suite, mais pour plus de détails, des travaux ont été menés par différents scientifiques tels que Tanaka et al. (en 1982), Sanchez et Gomez (en 2004), ou encore Bargiela et al. (en 2008).

Chapitre 3 : L'apport de la logique floue à la gestion des risques et à l'ORSA

La logique floue offre un cadre pour modéliser la représentation humaine des connaissances. Il s'agit d'une technique opérationnelle dont le but est de traiter numériquement des situations que nous ne pouvons décrire que qualitativement.

La commande floue aide à gérer des systèmes complexes de façon assez simple et facilement explicitable à une tierce personne. La difficulté de sa mise en œuvre réside principalement dans la mise au point des paramètres et des fonctions d'appartenance. Il s'agit d'un outil supplémentaire mis à la disposition des ingénieurs et chercheurs, permettant d'améliorer le temps de développement des systèmes informatiques. Dans le cadre de ce mémoire, l'intérêt de la logique floue dans le domaine de l'actuariat est discuté, afin d'en tirer des conclusions quant à la pertinence de son utilisation dans le domaine de la gestion des risques et de la mise en place de l'ORSA.

L'organe de direction doit jouer un rôle actif dans le processus ORSA. L'ORSA exige de définir une politique d'appétence au risque utilisée dans l'entreprise et notamment par les dirigeants. Elle doit être comprise par tous les décisionnels de l'organisme d'assurance. Ils doivent s'approprier cette politique et en tenir compte dans leurs prises de décisions stratégiques. Il nous paraît donc important d'en simplifier la lecture, de la rendre lisible et facilement compréhensible par tout un chacun. La logique floue nous semble être un outil pertinent pour essayer de « vulgariser » cette politique, en la rendant accessible par l'utilisation de variables linguistiques et en la rendant dynamique par le pilotage des paramètres des différentes fonctions d'appartenance et des règles d'inférence. La matrice d'inférence est exprimée en langage naturel, et non pas en chiffres seulement. Cela apporte de nombreux avantages, comme de pouvoir inclure un non-informaticien dans la gestion du système décisionnel ou encore de mieux modéliser certains aspects du langage naturel.

Un autre avantage de l'utilisation de la logique floue dans la définition de la politique de gestion des risques est l'utilisation croisée de plusieurs variables et de concepts mathématiques. La logique floue permet de définir une action en fonction de plusieurs indicateurs en entrée. Cela nous permet de croiser les informations sur notre profil de risque afin de prendre une décision la plus adéquate possible. Les règles d'inférence ainsi déterminées facilitent la lecture de la règle de gestion des risques. Lorsque la logique floue n'est pas utilisée, l'emploi de bornes strictes sous conditions de valeurs sur d'autres indicateurs de risques peut complexifier la lecture de la règle et sa compréhension. De plus, le montant obtenu en sortie tient seulement compte de l'appartenance à une plage de valeurs considérée pour les valeurs en entrée. La logique floue permet de définir une valeur de sortie qui a une signification mathématique et qui tient compte d'un degré d'appartenance aux plages de valeurs choisies. Les plages de valeurs considérées se chevauchent et ne sont pas strictement complémentaires. L'utilisation de la logique floue permet également d'éviter les effets de seuil souvent constatés lors de l'utilisation classique de bornes d'intervention. La puissance de la logique floue est de permettre la mise en place de systèmes d'inférence dont les décisions sont sans discontinuité, flexibles et non linéaires, plus proches du comportement humain qu'avec la logique binaire.

En logique classique, l'ensemble des décisions d'un système ne peut générer que des surfaces linéaires (une seule décision pour une classe donnée). Il est intéressant de noter qu'en logique floue, et grâce au système d'inférence, l'ensemble des décisions en fonction de chacune des variables ne présente pas de cassure et est plus flexible.

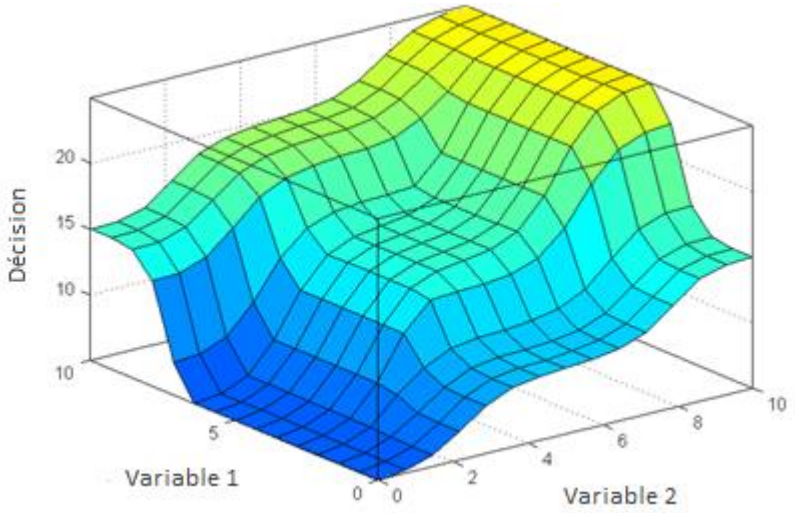


Figure 33 - Exemple d'ensemble des décisions en logique floue

Un tel ensemble n'est pas réalisable en logique classique, sauf à paramétrer chaque couple de variables (mais rendant alors l'utilisation et la justification de la règle de décision fastidieuses).

Les politiques de gestion des risques définies dans les entreprises peuvent être trop peu justifiées. La logique floue permet de définir une appétence aux risques en conservant le raisonnement qualitatif qui a entrainé la délimitation quantitative du risque accepté et acceptable. Le raisonnement linguistique est conservé et peut facilement être adapté les années suivantes aux nouvelles conditions de marché, en paramétrant de nouveau les règles de fuzzification.

Pour un calibrage précis, le dynamisme et la flexibilité du mécanisme d'inférence font de la commande floue un outil adéquat. En effet, la facilité de paramétrage permet d'analyser différents scénarios, en univers stressé ou non. Le manager pourra donc aisément en ressortir un calibrage pertinent.

L'application de la commande floue aux management actions permet aux dirigeants de prendre en compte le côté subjectif de leurs prises de décisions. De plus, les règles d'inférence modulables permettent un paramétrage rapide des management actions en cas de dégradation inattendue de la situation de l'entreprise.

Nous allons dans la suite de ce mémoire présenter un exemple de modélisation prospective pouvant être effectuée dans le cadre de l'ORSA et y incorporer l'approche des management actions par la logique floue. L'objectif est d'illustrer l'utilisation de la logique floue et les conclusions que nous pouvons en tirer par rapport à une méthodologie dite classique.

Partie 3 : Le modèle d'évaluation prospective d'une entreprise non-vie dans le cadre de l'ORSA

L'ORSA doit être intégré à la stratégie de développement de l'organisme d'assurance. A cet effet, et afin de remplir l'exigence d'évaluation du besoin global de solvabilité, une modélisation prospective doit être réalisée. Cette modélisation doit tenir compte du profil de risque spécifique, de l'appétence au risque définie et de la stratégie commerciale de l'entreprise. Concrètement, la mise en œuvre d'un modèle d'analyse prospective doit permettre de réaliser des projections pluriannuelles de la situation de l'entreprise. Les projections doivent considérer la volatilité du passif et de l'actif, et être établies de manière déterministe (avec des scénarios de choc établis) ou stochastique, en tenant compte des actions du management pour répondre aux nouvelles situations de l'entreprise.

La finalité de ce mémoire est d'illustrer l'apport de la logique floue dans la modélisation des management actions dans le cadre de l'ORSA. A cet effet, un modèle d'analyse prospective a été développé pour une entreprise non-vie. Il doit permettre d'obtenir le besoin global de solvabilité à un horizon de temps donné, correspondant au business de la compagnie. C'est à la fois un outil d'évaluation du besoin global de solvabilité et un outil d'analyse prospective de la situation financière de l'entreprise en fonction de la stratégie adoptée.

Pour y parvenir, l'outil intègre la projection des résultats de l'entreprise et ce, par branche d'activité. Il projette le bilan de la compagnie et ses fonds propres économiques en fonction de l'évolution du marché financier et du passif. Il intègre également la projection des exigences de capital, du calcul du besoin global de solvabilité ainsi que d'indicateurs de performance. Les projections prennent en compte les mesures que l'assureur pourrait entreprendre face aux différentes situations futures afin d'analyser l'impact des décisions du top management sur les résultats de l'entreprise.

Chapitre 1 : Le périmètre de modélisation

Dans le cadre de notre mémoire, nous avons donc développé un modèle d'analyse prospective pour un assureur non-vie. L'assureur considéré est un assureur non-vie possédant un portefeuille d'assurance automobile. L'assurance automobile proposée est constituée d'une garantie dommages tout accident, qui couvre tous les dommages matériels subis par le véhicule, quel que soit le type d'accident ou la faute commise par son conducteur. Elle est également constituée d'une garantie responsabilité civile qui couvre les dommages matériels ou corporels que le conducteur peut causer aux autres avec son véhicule.

Dans le cadre de la modélisation, les deux garanties sont projetées comme deux branches d'activités propres afin de tenir compte des lignes d'activités définies dans Solvabilité II : une branche auto-dommages (ligne d'activité « autre assurance des véhicules à moteur ») et une branche auto-responsabilité civile (ligne d'activité «assurance de responsabilité civile automobile »).

La branche auto-dommages est une branche avec des sinistres à fréquence élevée mais à coût faible, tandis que la branche auto-responsabilité civile, elle, a des sinistres à fréquence plus faible mais à coût plus élevé. La spécificité de la sinistralité de ces branches impose à l'assureur d'avoir un suivi précis de la performance de chacune d'entre elles.

Nous avons fait le choix de développer un modèle stochastique simplifié. L'objectif de ce mémoire n'est pas le modèle en lui-même mais la modélisation des management actions à travers la logique floue. A cet effet, les interactions entre l'actif et le passif n'ont pas été finement modélisées. Nous avons simulé d'une part l'actif et d'autre part le passif. Nous ne nous sommes pas intéressés aux problématiques d'investissement et de vente à l'actif à chaque instant t. Toutefois, le passif interfère sur l'actif dans la détermination du montant alloué sur les marchés financiers, qui doit correspondre à la fin de chaque année au montant du passif. Cette problématique sera abordée dans le chapitre 4.

1. Le choix des risques à modéliser

Un assureur non-vie est exposé à divers risques du fait de son activité d'assurance. Certains risques sont spécifiques à l'activité non-vie (risque de souscription) et d'autres sont propres à l'activité d'assurance (risque de marché, risque opérationnel, risque de défaut, etc.). Tous ces risques n'ont pas été modélisés dans le modèle mais seulement les plus impactants. Seuls les risques de marché (action et taux) ainsi que les risques de souscription ont été modélisés. Ce sont les deux risques les plus importants en termes de fréquence et d'impact sur le résultat des entreprises.

Le risque de marché est le risque de perte financière qui peut résulter des fluctuations des prix des instruments financiers qui composent un portefeuille. Le risque peut porter sur le cours des actions, les taux d'intérêt, les taux de change, les cours de matières premières, etc. Par extension, c'est le risque des activités économiques directement ou indirectement liées à un tel marché (par exemple un exportateur est soumis aux taux de change, un constructeur automobile au prix de l'acier) Il est dû à l'évolution de l'ensemble de l'économie, de la fiscalité, des taux d'intérêt, de l'inflation, et aussi du sentiment des investisseurs vis-à-vis des évolutions futures. Il affecte plus ou moins tous les titres

financiers. Dans la formule standard de la directive Solvabilité II, le risque de marché résulte du niveau ou de la volatilité des taux ou des prix de marché des instruments financiers.

Le risque de souscription est composé du risque de primes, du risque de provisions et du risque catastrophe. Le risque de primes représente le risque que les charges de sinistres soient plus importantes que les primes perçues pour leur indemnisation. Il apparaît au moment de la souscription d'un contrat et comprend les incertitudes liées aux montants des primes. Le risque de provisions provient de la sous-estimation des provisions de sinistres ou du caractère aléatoire des indemnisations. Le risque catastrophe résulte du risque d'événements extrêmes ou irréguliers non capturés par les risques de tarification et de provisionnement.

La modélisation des risques est explicitée dans les chapitres suivants. Le risque de marché est modélisé au travers de l'évolution de notre actif au cours de notre projection, modélisée stochastiquement. Le risque de souscription est modélisé au travers de la modélisation stochastique de la sinistralité. Le risque catastrophe n'a, lui, pas été modélisé.

2. Le choix de l'horizon de projection et de la mesure de risque

L'horizon de l'étude choisi est de 5 ans. Cette métrique a été définie conformément à la politique stratégique de l'assureur et conformément à son exposition aux risques.

Le besoin global de solvabilité correspond à l'évaluation du besoin en fonds propres nécessaires afin de faire face aux risques et afin d'être capable de couvrir l'appétence aux risques sur toutes les périodes du plan stratégique. Pour le définir, la mesure de risque à retenir est propre à chaque assureur. Une autre mesure de risque que la *Value-at-Risk* peut être considérée.

Afin d'avoir une concordance avec le modèle standard proposé par la directive, la mesure de risque retenue pour le calcul du besoin global de solvabilité dans notre exemple est la VaR à 99,5%. En effet, le principe posé par la directive est que l'exigence de capital (SCR) doit permettre d'absorber une perte probable (*Value-at-Risk*) au niveau de confiance de 99,5 % de la variation du BOF (ΔBOF) dans un an. C'est-à-dire que le BOF doit rester positive dans 99,5% des cas. Le BOF (*basic own fund*, anciennement appelé NAV, *net asset value*) correspond aux fonds propres économiques de notre compagnie d'assurance à la fin de chaque année de projection. Il est déterminé par la différence entre l'actif de l'assureur en valeur de marché et la valeur économique du passif. La VaR à 99,5% est la mesure de risque principalement utilisée au sein de la directive.

L'outil permet également d'effectuer des projections à horizon un an. Cela permet ainsi d'être en mesure de comparer notre résultat de besoin global de solvabilité avec l'exigence de capital réglementaire imposée par Solvabilité II.

3. Le choix de la structure

L'outil a été construit avec une approche intégrée. Cela signifie que la modélisation prend en compte tous les risques ainsi que leurs interactions afin de construire des scénarios reflétant au mieux le

fonctionnement réel de la compagnie. Les différents modules de risque ont été corrélés entre eux. Par exemple, la performance des actifs risqués n'est pas indépendante de la performance des autres indicateurs économiques. Cependant, nous n'avons pas pu approcher finement l'impact croisé de tous nos modules de risque, par manque d'informations ou de données. Le développement de la corrélation entre tous ces risques a donc été simplifié.

4. Le fonctionnement des projections

Le modèle d'analyse prospective implémenté projette jusqu'à l'horizon choisi les données de l'entreprise en fonction des paramètres renseignés dans l'outil. Les paramètres concernent à la fois les données de l'entreprise, les hypothèses du business plan (taux de croissance des branches par exemple), les lois de simulation des sinistres ou encore les règles de management actions.

Le modèle projette à la fois l'actif et le passif de la compagnie d'assurance, jusqu'à l'horizon de temps de 5 ans. Pour projeter l'actif, nous partons des valeurs de marché des différents actifs en possession de l'entreprise, et notamment de son portefeuille d'obligations. Nous calculons dans le même temps 1000 scénarios économiques à l'aide d'un générateur de scénarios économiques. En fonction des scénarios de taux, de performances d'actions et d'inflation ainsi récupérés, nous projetons nos flux d'actif dans le temps. Nous effectuons ainsi 1000 simulations de notre actif, en fonction des 1000 scénarios économiques.

En ce qui concerne le passif, nous utilisons les triangles de liquidation de chaque branche et les données initiales du portefeuille (nombre de contrats en stock, etc.). Les flux de passif sont ensuite projetés dans le temps en fonction de ces données et des paramètres de notre simulation (loi de fréquence et loi de coût de nos sinistres, taux de croissance du portefeuille, etc.). Nous obtenons ainsi 1000 simulations de notre passif, qui varie notamment en fonction de nos lois de sinistralité.

Les flux d'actif et de passif interagissent ensuite entre eux, en fonction des liens qui existent entre ces derniers (prise en compte de l'inflation sur les frais de gestion, prise en compte de la politique d'investissement, etc.). La projection de l'actif et du passif évolue donc en regard de la progression de l'un et de l'autre.

Nous obtenons ainsi nos résultats, pour chaque scénario économique. Le modèle calcule alors les indicateurs qui vont nous permettre de piloter les risques (capital économique, ratio combiné, taux de couverture et distribution du résultat).

En fonction de ces résultats, les management actions déterminent notre politique tarifaire à l'issue de chaque année. Les flux au passif sont altérés en fonction de ces nouvelles politiques (flux de primes notamment). Les flux d'actifs sont également modifiés pour être à chaque pas de temps en adéquation avec le niveau du passif (fonds propres et provisions techniques).

Schématiquement, notre modèle peut ainsi être représenté :

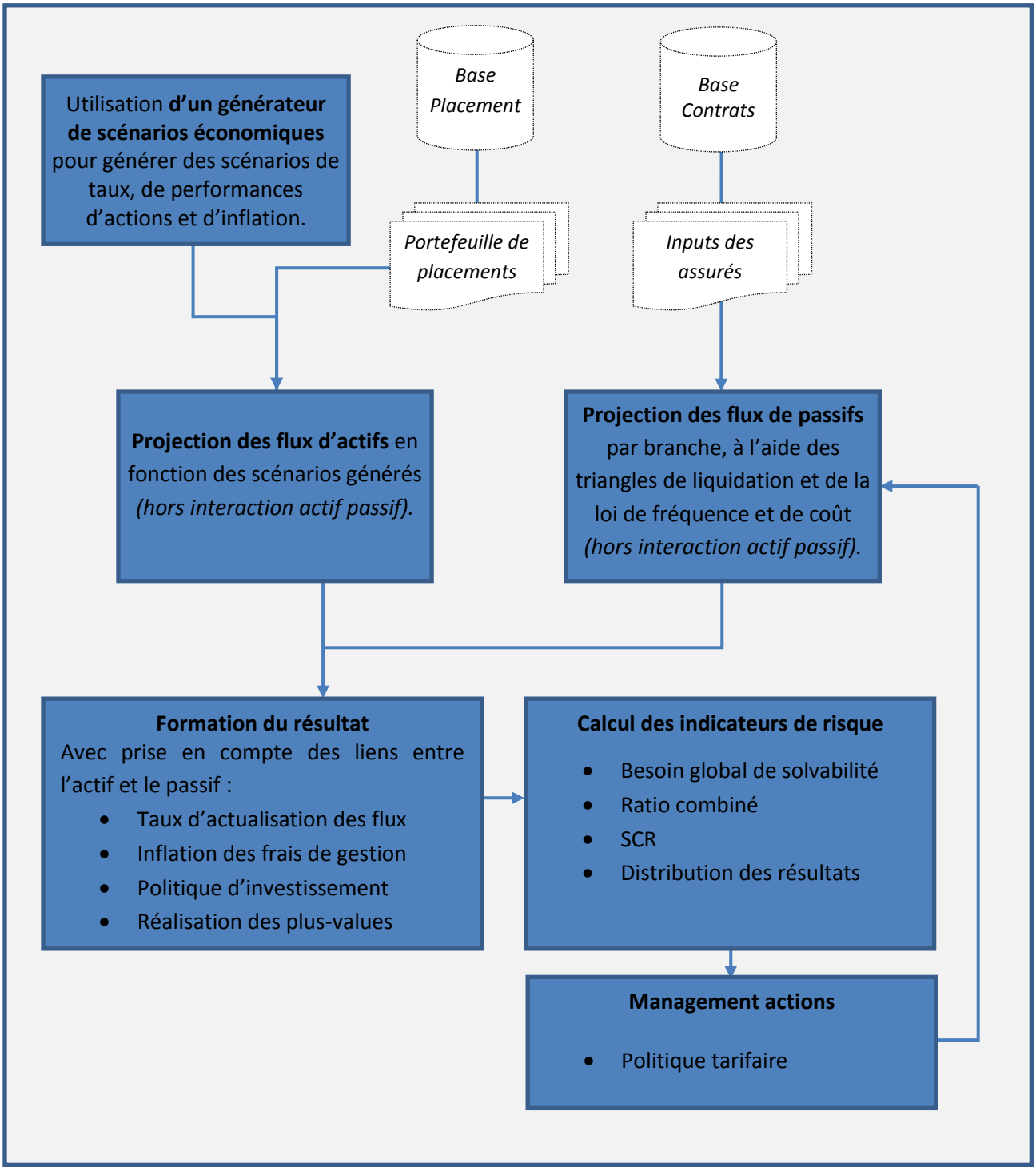


Figure 34 - Schéma de fonctionnement de notre modèle stochastique

Chapitre 2 : La modélisation de l'actif

1. Les données en entrée

Le portefeuille d'actifs considéré est composé d'obligations, d'actions et d'actifs monétaires. Les données en entrée pour la projection du portefeuille d'actifs sont les suivantes :

- La valeur de marché et la valeur comptable initiales des actifs financiers (actions, obligations, actifs monétaires) ;
- L'échéance et le taux de coupon pour les obligations en portefeuille à la date d'évaluation.

2. La génération de scénarios économiques

Pour projeter la valeur de marché de l'actif sur l'horizon de l'étude, nous avons utilisé un générateur de scénarios économiques (GSE).

Un générateur de scénarios économiques permet de simuler le cheminement dans le futur des variables économiques nécessaires pour réévaluer chaque année, en valeur de marché et en valeur comptable, l'actif et le passif d'un organisme assureur. Le générateur produit un grand nombre de scénarios économiques qui permettent d'estimer les distributions de probabilité de ces valeurs de marché dans le futur.

Les variables modélisées sont les actions, les taux d'intérêt nominal à court terme, la courbe des taux nominaux zéro-coupon et l'inflation.

Ces variables ne sont pas indépendantes. Le générateur tient compte des corrélations entre ces variables. Les tirages correspondant à un même scénario doivent toujours être utilisés simultanément.

2.1. Performance annuelle des actions

La performance annuelle des actions est générée à partir de la somme de trois lois normales : une loi normale pour simuler le cœur de la distribution et une pour chacune des deux queues de distribution qui traduisent le risque de krach boursier d'une part et de forte hausse du marché d'autre part.

Le modèle de diffusion de la performance des actions est calibré en univers monde réel à partir du CAC 40 net réinvesti.

2.2. Taux d'intérêt nominaux et courbes des taux nominaux zéro-coupon

Le taux court nominal est généré à l'aide d'un modèle de Black-Karasinski à deux facteurs.

Les courbes des taux sont générées par un modèle de Vasicek à deux facteurs (qui autorise une grande souplesse dans la forme des courbes de taux produites et qui permet notamment de générer des courbes de taux inversées).

Ce modèle est calibré à partir de la courbe des taux zéro-coupon publiée par l'EIOPA au 31 décembre 2015 avec ajustement de volatilité.

2.3. Taux d'inflation

L'inflation est projetée indirectement via la modélisation des taux réels (une fois les taux réels projetés, nous utilisons la relation de Fisher : taux nominaux = inflation + taux réels pour obtenir l'inflation).

3. La projection du portefeuille d'actifs

A partir des variables simulées, le portefeuille d'actifs de l'assureur est projeté dans le temps.

3.1. Projection du portefeuille d'actions

La poche actions est revalorisée chaque année à partir de la performance annuelle des actions modélisée.

3.2. Projection du portefeuille d'obligations

La valeur de marché du portefeuille d'obligations est calculée à chaque pas de temps à partir de la courbe des taux nominaux zéro-coupon modélisée et d'un spread propre à chaque obligation. Le spread est calculé au 31/12/2015 à partir de la valeur comptable et de la valeur de marché constatée de chaque obligation. Nous faisons l'hypothèse implicite que le spread est constant dans le temps, quelles que soient les conditions de marché.

La chronique de produits financiers générés par le portefeuille obligataire est également calculée.

Pour chaque pas de temps, nous modélisons également la valeur de marché future d'obligations nouvellement émises. Le montant à investir en obligations pour une année future donnée est ainsi investi dans ces nouvelles obligations, achetées au pair.

3.3. Projection du portefeuille monétaire

L'hypothèse réalisée est que la performance du portefeuille monétaire correspond à la valeur du taux court nominal à chaque pas de projection.

4. Les données en sortie

Grâce au générateur de scénarios économiques et à la projection de l'actif, on obtient les résultats suivants :

- L'évolution du portefeuille d'actions,
- L'évolution du portefeuille obligataire :
  - La valeur de marché du portefeuille obligataire,
  - Les produits financiers obligataires.
- L'évolution du portefeuille monétaire,
- La courbe des taux pour chaque année à venir,
- L'évolution de l'inflation.

Chapitre 3 : La modélisation du passif

1. Les données en entrée

Plusieurs données et vecteurs sont à prendre en compte pour la modélisation du passif :

- Le nombre de contrats initial,
- Le taux de croissance de chaque branche,
- Le montant moyen des primes,
- Le taux de chargement des primes,
- Les frais de gestion des sinistres,
- Le triangle de liquidation de chaque branche vu à t=0,
- La cadence de règlement de chaque branche.

Notre exemple comporte deux branches distinctes. Pour chaque branche, l'outil projette les différents flux (les primes, les prestations, les frais) et les montants de provisions et de capitaux propres sur l'horizon de l'étude.

2. La projection des éléments du passif

2.1. Flux de primes

Par souci de simplification de modélisation, nous déterminons un montant moyen de primes pour chaque branche considérée. Nous ne faisons pas une approche par *model point*, et nous considérons la masse globale de contrats par branche. Cela implique que notre politique tarifaire (diminution ou hausse des primes) sera appliquée uniformément à notre branche. Nous ne modélisons pas de politique tarifaire segmentée en fonction du profil de risque de chaque assuré, mais raisonnons au global.

Pour chaque année *i*, les primes commerciales de la branche *j* sont obtenues de la manière suivante :

$$Montant\ Primes\ commerciales_{i,j} = Nb\ contrats_{i,j} \times Montant\ moyen\ primes_{i,j}$$

Le montant moyen des primes est un paramètre qui varie dans le temps en fonction de la politique tarifaire de l'assureur. Cette politique est définie indépendamment pour chaque branche. Elle est modélisée à l'aide d'un management action, qui fixe la politique tarifaire en fonction du contexte économique de l'entreprise. Ce management action est présenté un peu plus loin.

Le nombre de contrats évolue dans le temps en fonction du taux de croissance de la branche.

$$Nb\ contrats_{i,j} = Nb\ contrats_{i-1,j} \times \left(1 + taux\ croissance_j\right)$$

Le taux de croissance est fixé en fonction du plan de développement de l'entreprise et est considéré constant tout au long de la projection. Il évolue néanmoins dans le temps en fonction de la politique tarifaire. A partir d'un seuil d'augmentation tarifaire fixé, nous considérons que l'augmentation du tarif entraîne une diminution du taux de croissance proportionnellement à l'amplitude de cette augmentation tarifaire.

2.2. Flux de prestations

Les flux de prestations correspondent à la somme des règlements de chacune des branches. Le calcul des prestations est effectué à partir des triangles de liquidation de chaque branche. Les règlements futurs sont obtenus en fonction des sinistralités ultimes futures et des cadences de règlement obtenues avec la méthode du Chain-Ladder sur nos sinistres passés. La sinistralité ultime des années de survenance futures est simulée selon une approche fréquence et coût. Le choix des lois de fréquence et de coût et de leur paramétrage dépend de la branche étudiée. Le choix des lois supposées représenter au mieux la sinistralité et leur calibrage sont des éléments centraux dans la quantification du risque. L'hypothèse forte réalisée ici est que la sinistralité passée reproduit bien les caractéristiques de la branche étudiée. Cette hypothèse qui peut s'avérer relativement justifiée sur un groupe homogène de risques est inexacte lorsque la politique de souscription a évolué dans le temps. Une autre hypothèse forte réalisée est l'indépendance de la sinistralité entre les branches dommages automobile et responsabilité civile automobile.

Les lois utilisées dans l'outil sont des lois fréquemment utilisées sur le marché. Nous avons choisi la loi de Poisson pour la loi de fréquence et la loi log-normale pour la loi de coût. La loi de Poisson a été paramétrée à partir de la fréquence observée sur chaque branche. La loi log-normale a été calibrée en fonction du coût moyen observé sur chaque branche et de la volatilité mesurée de ce montant.

Pour chaque branche d'activité, le triangle de liquidation sur nos sinistres passés des montants cumulés est utilisé comme point de départ. Dans un premier temps, on calcule les facteurs de développement du triangle, afin de pouvoir calculer les données manquantes en regard de nos données historiques. Dans un second temps, on va simuler la charge ultime des années futures, à partir des lois choisies. Pour chaque simulation et chaque année de projection, on « tire » pour chaque assuré une valeur sur ses lois. On simule ainsi pour chaque assuré le nombre de sinistres survenus sur l'année et le coût de chacun de ces sinistres. En additionnant les montants de tous les sinistres ainsi estimés, on obtient les charges ultimes des années futures pour chaque pas de temps et jusqu'à notre horizon de projection. Pour une année de projection, on a, pour l'année future *i*, l'assuré *j* et la simulation :

$$Charge\ ultime_{i,k} = \sum_{j} loi\ fréquence_{i,j,k} \times loi\ montant_{i,j,k}$$

Pour chaque année future, on calcule ensuite le montant de règlement cumulé pour une année de développement donnée. Pour y parvenir, nous partons de notre montant de charge ultime que nous

avons simulé et nous utilisons les facteurs de développement obtenus avec la méthode du Chain-Ladder.

Le facteur de développement du Chain-Ladder est donné par la relation suivante :

$$\lambda_j = \frac{\sum_{i=1}^{n-j+1} C_{ij}}{\sum_{i=1}^{n-j+1} C_{ij-1}}$$

où : C_{ij} est le montant des paiements cumulés des sinistres survenus l'année *i* et payés jusqu'à l'année *j*, avec *i* variant de 1 à n et *j* de 1 à n-*i*+1.

Ce facteur de développement est utilisé quelle que soit l'année de survenance du sinistre. La cadence de paiement des sinistres se déduit des facteurs de développement du Chain Ladder, ces facteurs représentant l'accroissement des paiements cumulés entre l'année de développement *j* et l'année de développement *j*+1.

On a, pour l'année de survenance *i*, l'année de développement *j* et la simulation *k* pour une branche donnée :

$$Règlement\ cumulé_{i,j,k} = Charge\ ultime_{i,k} \times CP(j)$$

avec :

$$CP(j) = \frac{1}{\prod_{l=j+1}^{n} \lambda_l}$$

où $CP(j)$ représente la cadence de règlement cumulée de la branche considérée l'année *j*.

Le règlement de l'année de développement *j* pour l'année de survenance *i* et pour la simulation *k* correspond alors à :

$$Règlement_{i,j,k} = Règlement\ cumulé_{i,j,k} - Règlement\ cumulé_{i,j-1,k}$$

$$Règlement_{i,j,k} = Charge\ ultime_{i,k} \times \frac{1}{\prod_{l=j+1}^{n} \lambda_l} - Charge\ ultime_{i,k} \times \frac{1}{\prod_{l=j}^{n} \lambda_l}$$

Et donc,

$$Règlement_{i,j,k} = Charge\ ultime_{i,k} \times \frac{\lambda_j - 1}{\prod_{l=j}^{n} \lambda_l}$$

On calcule ensuite, pour chaque simulation, le règlement effectué lors d'une année précise. Le règlement total de l'année *l* pour la simulation *k* revient à la somme des règlements payés l'année *l* pour les années de survenance dont le règlement n'est pas arrivé à expiration. Cela revient à la somme des règlements sur la diagonale de notre triangle de liquidation telle que notre année *l* correspond à l'année de survenance *i* additionnée de l'année de développement *j*.

On a donc :

$$Règlements_{l,k} = \sum_{i,j \in EC} Règlement_{i,j,k}$$

où : $EC = \{i, j \ / \ l'année\ de\ survenance\ i\ n'est\ pas\ finie\ d'être\ réglée, i + j = l\}$

Le calcul est ainsi effectué pour chacune de nos branches.

Les flux de prestations de chacune de nos branches ont ainsi été projetés. Pour chaque année de projection et pour chaque simulation, ils sont majorés de l'inflation cumulée. Nous obtenons donc le montant des règlements pour chacune de nos branches et pour chaque année jusqu'à notre horizon T. Cependant, nos branches ont été projetées séparément l'une de l'autre par souci de simplification. Elles sont simulées indépendamment. La corrélation entre les branches d'activité n'a pas été prise en compte dans le modèle. La corrélation entre les branches non-vie pourrait être particulièrement forte en cas de catastrophes naturelles. La modélisation de cette corrélation pourrait être effectuée à l'aide des modèles à chocs communs qui prennent en compte ce phénomène de corrélation aux quantiles élevés.

2.3. Provisions techniques

L'activité d'assurance se caractérise par une inversion du cycle de la production. La prime est encaissée immédiatement, alors que la prestation et le règlement de l'indemnité n'interviennent qu'après. De plus, le règlement peut ne jamais survenir dans le cas de la non-réalisation de l'événement assuré. Une autre spécificité de l'assurance est l'existence d'un possible décalage entre la date de survenance du sinistre, la date de déclaration du dit sinistre et la date de paiement effectif par l'assureur. Ces caractéristiques rendent nécessaire le rattachement des charges aux produits afin de garantir la solvabilité de l'entreprise. L'assureur doit donc constituer des réserves. Nous parlons alors de provisions techniques. Il s'agit de l'ensemble des provisions évaluées par les entreprises d'assurance suffisantes pour le règlement intégral de leur engagement vis à vis des assurés ou bénéficiaires de contrats.

Dans le cadre de l'assurance non-vie et dans le contexte Solvabilité II, les provisions techniques sont calculées comme la somme d'une meilleure estimation et d'une marge de risque. En non-vie, la meilleure estimation est elle-même divisée en provisions de primes et de sinistres.

a) Best estimate de primes

La provision *best estimate* pour primes est l'actualisation des flux entrants et sortants résultant d'une nouvelle année d'activité (dans le cadre des contrats annuels renouvelés dès le 01/01/N+1). Ces flux comprennent donc les cotisations qui seront reçues en N+1, les prestations qui seront versées dans les années futures au titre des sinistres survenus en N+1, ainsi que les frais engendrés par ces cotisations et prestations. La provision *best estimate* pour primes est négative si le contrat est rentable.

Nous avons fait l'hypothèse simplificatrice que les contrats, à durée de souscription annuelle, étaient souscrits au 1er janvier de chaque année. Les contrats au 1er janvier de l'année suivante sont certains (sinon ils auraient été résiliés dans le délai de préavis légal de 3 mois avant la date de fin) et nous devons donc calculer un *best estimate* de primes sur ces futurs flux de primes. Toutefois, les assurés peuvent résilier à tout moment après un an leur contrat avec la loi Hamon. Nous devons donc tenir compte d'un taux de résiliation annuel dans notre calcul.

La modélisation des prestations futures des affaires nouvelles s'effectue via un S/P cible à l'ultime. Nous faisons l'hypothèse que la cadence de règlement de ces sinistres suit la même cadence de règlement que ceux calculés à l'aide de la méthode de Chain-sur nos sinistres passés.

b) Best estimate de sinistres

Le *best estimate* de sinistres se rapporte à l'engagement de l'assureur de régler des sinistres qui se sont déjà produits, indépendamment de la question de savoir s'ils ont été déclarés ou non. Cet engagement est composé de tous les flux à venir relatifs à ces sinistres, c'est-à-dire les prestations, les frais de gestion des sinistres et les recours.

Pour chaque année de projection et chaque simulation, on effectue donc un calcul de provision *best estimate* de sinistre. Elle correspond à la moyenne des futurs flux de trésorerie, pondérée en fonction de leurs probabilités, compte tenu de la valeur temporelle de l'argent, laquelle est estimée sur la base de la courbe des taux sans risque pertinente.

Ce calcul s'effectue à partir du triangle de liquidation, des cadences de règlement calculées pour chaque branche et de la sinistralité simulée. Pour cela, on utilise la méthode de calcul du Chain-Ladder. On estime ainsi les règlements futurs.

Pour chaque branche, la provision *best estimate* de l'année de projection *i* et de la simulation *k* est calculée comme suit :

$$Provisions\ Best\ estimate\ de\ sinistre_{i,k} = \sum_{j=i+1}^{n} \frac{flux_{j,k}}{(1 + r_{j-i,k})^{j-i}}$$

où : $flux_{j,k}$ est égal aux montants de règlements et de frais futurs payés l'année *j* selon la simulation *k*.

$r_{j,k}$ est le taux zéro-coupon d'échéance j et de la simulation k.

i l'année future considérée.

c) Marge de risque

La provision technique est égale à la somme de la provision *best estimate* et de la marge de risque.

La marge de risque correspond au montant que l'on doit ajouter au *best estimate* pour qu'un autre assureur accepte de reprendre le passif. Cette marge additionnelle au *best estimate* permet de rendre compte du coût engendré par l'immobilisation du capital chez l'assureur repreneur.

Pour simplifier nos calculs, la marge de risque a été déterminée en pourcentage des provisions techniques. Cette méthodologie est conforme aux méthodes simplifiées proposées par l'EIOPA (orientation 62, méthode 4, du guideline « Orientations sur la valorisation des provisions techniques »). Dans notre modèle, nous avons pris une marge de risque correspondant à 8% de la provision *best estimate* nette de réassurance. Ce pourcentage est cohérent avec les observations de l'ACPR dans « Analyse de l'exercice 2015 de préparation à Solvabilité II », publiée en décembre 2015.

2.4. Flux de frais

Les flux de frais correspondent aux frais de gestion des sinistres. Les frais de gestion des sinistres dépendent des sinistres survenus et donc de l'inflation également. Pour chacune des branches, les frais de gestion des sinistres pour l'année *i* et la simulation *k* sont obtenus en appliquant un taux de frais de gestion. Ce taux est fixé pour chaque branche selon les montants de frais observés sur notre portefeuille. On a :

$$Frais\ gestion_{i,k} = \%frais\ gestion \times Règlements_{i,k}$$

2.5. Flux de réassurance

La réassurance est un outil essentiel pour un assureur. Elle permet de diminuer la volatilité du résultat. Nous avons cependant fait le choix de ne pas la modéliser dans l'outil. L'objectif de ce mémoire ne concerne pas la réassurance et ne pas modéliser de traités de réassurance permet de simplifier la lecture des résultats.

Chapitre 4 : La modélisation des interactions entre l'actif et le passif

1. La valeur de l'actif en regard du passif

La projection de la valeur de l'actif sur l'horizon de l'étude est effectuée en prenant en compte les règles suivantes :

- l'allocation stratégique cible en valeur de marché est définie par l'assureur,
- les règles de réalisation des plus-values des actifs sont définies par l'assureur,
- les investissements des nouveaux flux en obligation se font dans des obligations 10 ans (choix de l'assureur dans sa politique d'investissement).

À tout instant, la valeur de l'actif projeté doit cependant correspondre à la totalité du passif. Le montant investi doit coïncider avec la somme du montant des fonds propres et du montant des provisions techniques. Dans notre modèle, l'équilibre entre l'actif et le passif est vérifié à l'issue de chaque année de projection.

Schématiquement, on a :

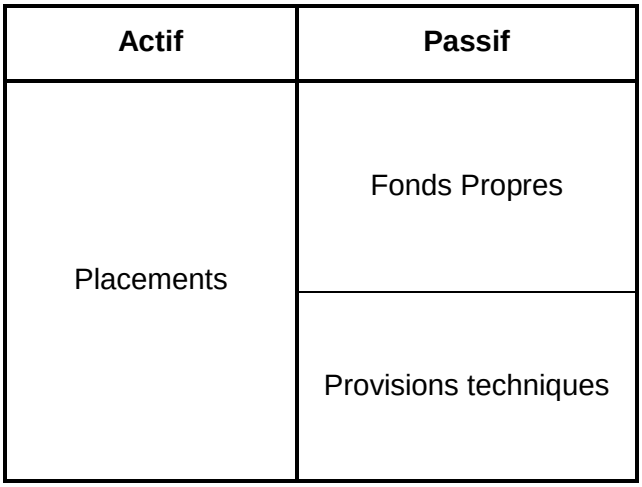


Figure 35 - Bilan simplifié d'un assureur

Chaque année, la valeur de l'actif évolue en fonction des marchés financiers, et la valeur du passif en fonction de la sinistralité et du taux de croissance du portefeuille. Nous devons cependant aligner notre actif sur la nouvelle valeur du passif. Nous déterminons donc une valeur de marché cible en fonction de l'évolution du passif et du résultat de l'assureur.

Afin d'atteindre cette valeur d'actif cible, nous devons effectuer à la fin de chaque année le balancement du portefeuille d'actifs, en réalisant des désinvestissements et des investissements à l'actif, et en tenant compte :

- de l'évolution de la valeur de marché de chaque classe d'actifs,
- des flux d'actif (tombées de coupons ou arrivées à échéance des obligations, désinvestissements pour la réalisation des plus-values, etc.),
- des flux de passif (primes, règlements, frais).

Dans le même temps, nous nous efforçons de respecter l'allocation cible entre les actions, les obligations et le monétaire.

Pour chaque année future et chaque simulation d'actif et de passif, nous calculons donc une valeur de marché cible. Mathématiquement, nous avons, pour l'année *i* (en l'absence de réassurance) :

$$VM^{i}_{cible} = VM^{i}_{avantdésinvest} + \sum Flux^{i}_{actif} + Flux^{i}_{primes} - Flux^{i}_{prestations} - Flux^{i}_{frais}$$

Les flux à l'actif correspondent aux plus-values réalisées, aux coupons et aux remboursements perçus. Pour chaque actif, nous calculons sa nouvelle valeur à obtenir afin de respecter l'allocation stratégique définie par l'assureur. La valeur de marché de l'actif *j* est définie de la sorte :

$$VM^{i,j}_{cible} = VM^{i}_{cible} \times \%allocation^{i,j}_{cible}$$

Nous procédons à la fin de chaque année à des désinvestissements/investissements sur chacune de nos classes d'actifs afin de respecter la nouvelle valeur de marché cible. Nous avons donc des flux d'investissement ou de désinvestissement l'année *i* pour chaque actif *j*, qui sont donnés par :

$$Flux^{i,j}_{invest/desinvest} = VM^{i,j}_{cible} - VM^{i,j}_{avant\ désinvest}$$

La valeur de marché de l'actif *j* après investissement/désinvestissement est alors donnée par :

$$VM^{i,j}_{après\ désinvest} = VM^{i}_{cible} = VM^{i}_{avant\ désinvest} + Flux^{i,j}_{invest/desinvest}$$

et on a :

$$VM^{i}_{après\ désinvest} = VM^{i+1}_{avant\ désinvest}$$

Nous n'avons pas pris en considération les problématiques de liquidité des marchés financiers. Comme nous l'avons déjà énoncé, l'objectif de ce mémoire n'est pas le modèle en lui-même mais la modélisation des management actions à travers la logique floue. Nous avons fait en sorte de ne pas atteindre un niveau de sophistication trop important pour notre modèle.

2. La production des résultats

Nos simulations à l'actif et au passif ont été construites l'une en regard de l'autre. Les performances et les variables du marché financier ont un impact sur le passif et les résultats au passif ont un impact sur la somme allouée sur les marchés financiers. Avec les projections d'actifs et de passifs décrites précédemment, nous pouvons donc produire un grand nombre de simulations de résultats et de bilans économiques futurs en fonction des flux et des produits financiers futurs.

Au total, nous obtenons 1000 simulations d'évolution de l'actif et du passif. Ces simulations servent à obtenir :

- Le taux de couverture du SCR,
- la distribution du delta BOF,
- le niveau de ratio combiné de chaque branche,
- la distribution du résultat de chaque branche,
- la distribution du résultat total.

Le modèle d'évaluation prospective permet donc la production d'indicateurs afin d'aider le pilotage des risques. Le principe de l'ORSA n'est pas seulement de proposer une exigence de capital pour répondre aux exigences de Solvabilité II. L'ORSA doit permettre aux dirigeants des compagnies d'assurance d'être capables d'apprécier leurs risques et de mesurer leurs impacts sur leur résultat.

Le taux de couverture du SCR

Le SCR est calculé pour chaque simulation et à chaque pas de temps, à l'aide de la formule standard. Les branches marché et souscription non-vie sont les branches concernées.

Pour le SCR marché, les SCR de crédit, de change et de concentration ne sont pas calculés par souci de simplification. Pour le SCR action, nous considérons ne posséder que des actions de type 1. Pour le SCR de taux, nous considérons notre portefeuille obligataire dans son ensemble. Nous retenons une méthode simplifiée pour le calcul de la variation de l'actif suite à un choc de taux. La variation de l'actif est approchée par le produit entre la sensibilité du portefeuille obligataire et le choc de taux, prévu par la formule standard, pour une maturité égale à la sensibilité.

Pour le SCR souscription non-vie, nous calculons les modules provisions, primes et rachat. Le module catastrophe n'a pas été abordé.

La prise en compte des capacités d'absorption des pertes par les impôts différés et par les provisions techniques n'a pas été réalisée par souci de simplification.

En fonction du montant de capital requis et de fonds propres disponibles, le taux de couverture du SCR est calculé.

La distribution du delta BOF

A chaque itération et pour chaque simulation, nous calculons la variation du BOF. A la fin de la projection, nous pouvons ainsi obtenir une distribution du delta BOF à partir des 1000 simulations.

La distribution du delta BOF permet de calculer le besoin global de solvabilité en fonction de la mesure de risque retenue.

Le besoin global de solvabilité

Comme énoncé précédemment, le besoin global de solvabilité est calculé dans notre exemple à partir de la distribution du delta BOF et correspond à la VaR à 99,5% de cette distribution. C'est le montant que l'entreprise devra allouer pour couvrir ses pertes et être solvable dans 199 cas sur 200, en tenant compte des management actions et des politiques stratégiques de l'entreprise.

Le ratio combiné de chacune de nos branches et son évolution dans le temps

Le ratio combiné est un taux qui correspond au rapport entre les montants décaissés dans l'année (règlements, dotation de provisions, frais) et les montants encaissés (primes versées par les assurés). Un ratio inférieur à 100% indique que les recettes de l'année de l'assureur sont supérieures aux dépenses de l'année et que son activité est rentable.

Ce taux évolue, pour chaque simulation et dans le temps, en fonction de la sinistralité de chacune de nos branches et de l'évolution du tarif. On observe ainsi l'évolution du ratio jusqu'à notre horizon. On peut en déduire une tendance et juger de l'adéquation du montant de nos primes en fonction du risque. On peut également observer l'impact du management action et de la modification du montant moyen des primes en fonction du ratio combiné.

La distribution des résultats à l'horizon, par branche et au global

Le résultat est déterminé, pour chaque branche et pour chaque pas de temps, par la différence entre la somme des recettes (primes commerciales et produits financiers) et la somme des pertes (règlements et frais de gestion) diminué du delta de provision (la différence entre la provision fermeture et la provision d'ouverture).

La distribution du résultat, par branche ou au global, nous permet d'observer la VaR à 99,5% de notre résultat. Nous pouvons ainsi estimer la perte extrême à laquelle pourra être exposée l'entreprise.

Avant d'analyser les résultats en sortie de notre modèle, nous allons d'abord nous intéresser à la modélisation du management action de revalorisation tarifaire, que ce soit en logique floue ou en logique dite classique, en logique binaire.

Partie 4 : La modélisation du management action de revalorisation tarifaire

Le modèle d'évaluation prospective doit inclure les management actions. C'est un élément important du modèle, qui permet de modéliser la projection de notre résultat au plus près de la réalité.

Pour rappel, les management actions désignent les mesures que le top management d'un organisme d'assurance pourrait entreprendre dans différentes situations de marché. La modélisation des management actions dans un modèle d'évaluation prospective rend plus réaliste la projection de la situation financière future de l'entreprise.

L'action du management que nous avons intégrée dans notre modèle porte sur la politique de revalorisation tarifaire. Dans l'objectif d'illustrer l'apport de la logique floue, nous avons choisi d'implémenter une revalorisation tarifaire floue. Nous avons également implémenté une revalorisation modélisée classiquement, en logique binaire, afin d'être en mesure de comparer les deux méthodes. Nous allons maintenant présenter les deux modélisations effectuées.

Chapitre 1 : Les limites du management action de revalorisation tarifaire

Avant de rentrer dans le détail du développement de ce management action en logique floue et en logique classique, il convient d'attirer l'attention sur les limites de ce management action.

Le montant du tarif est la variable d'ajustement ayant un impact le plus direct sur les résultats de l'entreprise, mais les conséquences de sa modification sont difficiles à anticiper. La sinistralité du portefeuille peut augmenter avec le tarif et la croissance du nombre de contrats diminuer. Une hausse du tarif permet d'équilibrer le compte de résultat mais peut entraîner une hausse de la sinistralité si les assurés peu sinistrés vont à la concurrence afin de bénéficier d'un meilleur tarif.

1. Les conséquences d'une revalorisation tarifaire en non-vie

En assurance non-vie plus spécifiquement, il est difficile d'anticiper l'évolution du ratio combiné lors d'une augmentation tarifaire. En toute logique, à sinistralité constante, une augmentation des primes a pour impact de diminuer le taux de sinistre à prime. Dans les faits, la sinistralité évolue en parallèle des primes. L'assureur est exposé à un risque d'anti-sélection : en cas d'augmentation tarifaire, les « bons risques » considéreront la prime trop élevée et seront tentés de résilier leurs contrats pour aller à la concurrence ; les « mauvais risques », eux, considéreront la prime encore acceptable et resteront chez l'assureur. Si cette situation se produit, il y aura donc moins de « bons risques » et le taux de sinistralité augmentera. Il est toutefois difficile de quantifier l'augmentation de ce taux de sinistralité.

Le comportement des assurés dépend également des revalorisations effectuées par la concurrence. Si l'augmentation tarifaire proposée par l'assureur est conforme aux revalorisations tarifaires pratiquées par le marché, les résiliations devraient être moindres.

Une solution de modélisation pourrait consister en une modélisation distincte du nombre d'assurés, répartis entre les « bons risques » et les « mauvais risques », avec une sinistralité propre à chaque catégorie. Nous pourrions également calculer une revalorisation tarifaire moyenne de la concurrence à chaque pas de temps. Le nombre d'assurés entre ces deux classes pourrait donc évoluer en fonction des revalorisations tarifaires proposées par l'assureur et de celles de ses concurrents.

Par souci de simplification, et car l'impact est difficilement quantifiable, nous n'avons pas dissocié les assurés et le taux de sinistralité est considéré rester identique lors d'une revalorisation tarifaire. Nous faisons donc l'hypothèse implicite que la revalorisation tarifaire réalisée par l'assureur est conforme à la pratique du marché et que les nouveaux contrats ont une sinistralité similaire aux contrats en portefeuille. Toutefois, afin que l'augmentation tarifaire ne soit pas au seul bénéfice de l'assureur, nous avons défini un seuil d'augmentation tarifaire à partir duquel le taux de croissance du portefeuille est impacté. Ainsi, en augmentant son tarif au-dessus du seuil fixé, l'assureur augmentera sa rentabilité par contrat (en ayant un ratio combiné qui diminue) mais verra son

résultat global possiblement diminuer à cause d'un taux de croissance plus faible (ou qui peut même être négatif) suites aux résiliations liées à la hausse des tarifs.

2. L'incidence du taux de revalorisation sur la croissance du portefeuille

Nous avons donc considéré que la sinistralité demeurait identique quelle que soit la revalorisation tarifaire. Nous avons toutefois fixé un seuil au-dessus duquel l'augmentation tarifaire a un impact sur le taux de croissance du portefeuille, à cause de la résiliation plus importante des assurés.

Nous fixons la revalorisation moyenne du marché à 1,2% (estimé à partir des données de marché). Pour notre assureur, nous considérons que si sa revalorisation tarifaire est inférieure à cette revalorisation moyenne, le taux de croissance du portefeuille augmente de 0,4% par écart de 1%. Si sa revalorisation est au contraire supérieure à la revalorisation moyenne du marché, nous considérons que le taux de croissance du portefeuille diminue de 0,7% par écart de 1%. Nous avons fait le choix d'appliquer un impact sur le taux de croissance plus faible dans le cas où sa revalorisation tarifaire est en dessous de celle du marché : l'hypothèse implicite est qu'il est plus difficile de gagner des nouveaux clients que d'en perdre.

Nous pouvons représenter sur un graphique l'impact sur le taux de croissance en fonction du taux de revalorisation :

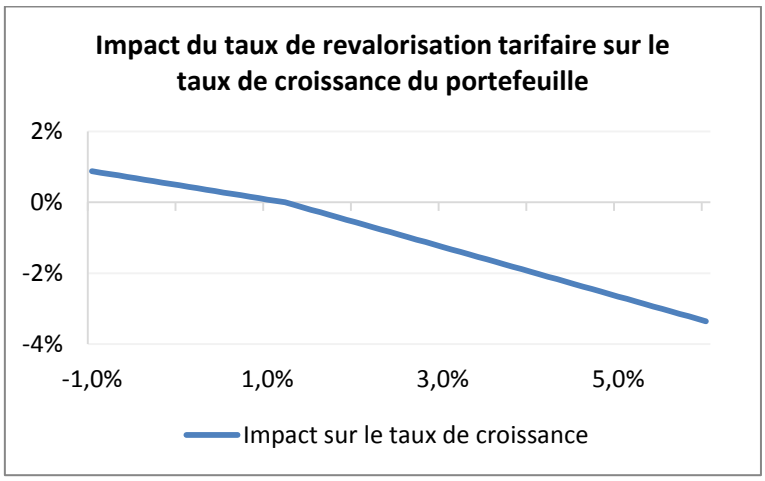


Figure 36 - Impact sur le taux de croissance du portefeuille en fonction du taux de revalorisation tarifaire

Ainsi, si l'assureur revalorise ses contrats de 2% par exemple, la croissance du portefeuille sera négative, de -0,6% : le nombre de résiliations sera supérieur au nombre de nouveaux contrats.

Chapitre 2 : La modélisation en logique floue

1. La fuzzification de la politique tarifaire

La politique tarifaire des organismes d'assurance est un élément stratégique de leur développement. Cette importance est d'autant plus vraie pour les assureurs non-vie. Un tarif inadapté aux risques auxquels l'assureur est exposé peut générer des pertes importantes. Un tarif trop élevé par rapport à la concurrence peut entraîner un trop faible volume d'affaires nouvelles pour assurer la croissance du portefeuille et la mutualisation des risques.

C'est pour toutes ces limites exposées précédemment que l'utilisation de la logique floue nous paraît pertinente. En effet, il est difficile de mettre en place un management action avec des variables et des intervalles précis. Le top management doit pouvoir facilement modifier la règle, cette dernière doit donc être lisible et compréhensible par un intervenant extérieur au développement du modèle. De plus, la logique floue nous permet de normer des variables et donc d'agréger des données différentes pour un unique résultat final.

Pour modéliser notre management action, nous avons tenu compte du niveau de ratio combiné observé sur chacune de nos branches ainsi que du ratio global de couverture du SCR. Cela permet à notre organisme d'assurance de considérer le résultat de l'année (le ratio combiné) mais aussi de le prendre en considération dans une approche globale, en tenant compte de la capitalisation de la compagnie (au travers du ratio de couverture du SCR). Ainsi, nous sommes prêts à accepter un ratio combiné détérioré si la santé de l'entreprise n'est pas en danger. Au contraire, nous serons plus exigeants sur notre ratio combiné si la capitalisation de la société est jugée insuffisante.

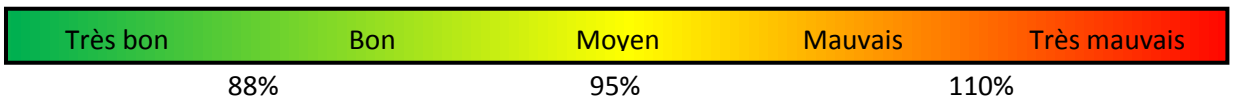
1.1. Elaboration des fonctions d'appartenance

La fuzzification de nos données permet de traiter les entrées du système. L'élaboration de fonctions d'appartenance va transformer les variables réelles en nombres flous. Les trois variables choisies pour la modélisation de la revalorisation tarifaire sont le ratio combiné, le ratio de couverture du SCR et l'évolution tarifaire.

a) Ratio combiné

Nous avons défini, pour le ratio combiné, les classes puis les fonctions d'appartenance associées.

Afin d'avoir un mécanisme précis, sans non plus trop complexifier le modèle, nous avons déterminé les 5 classes suivantes :



Nous avons ensuite défini les fonctions d'appartenance pour chacune de ces 5 classes. Les bornes des différentes classes ont été déterminées à dire d'expert en fonction des pratiques du marché.

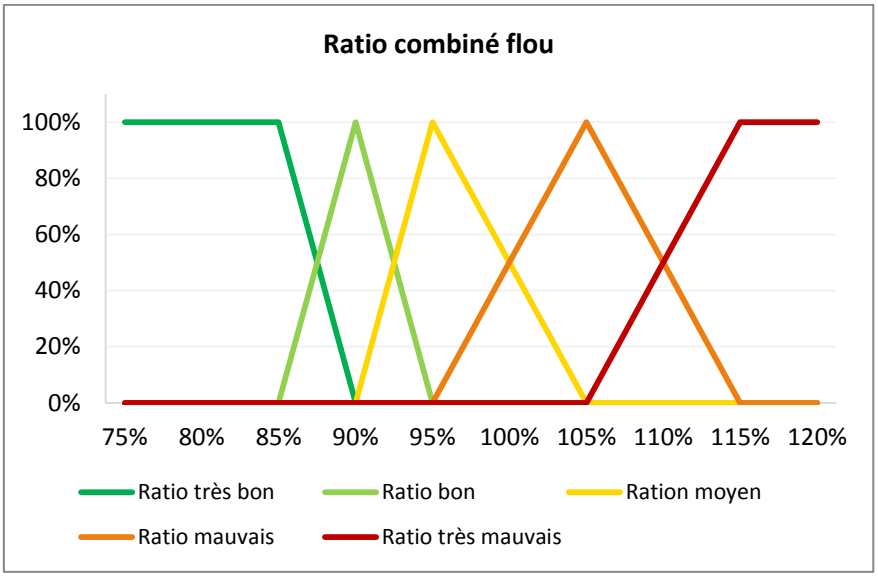
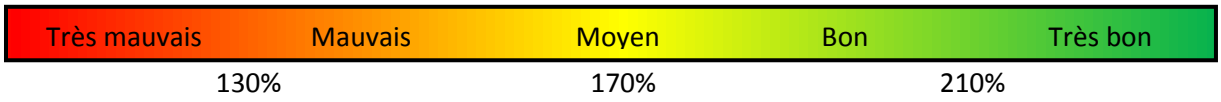


Figure 37 - Fonctions d'appartenance du ratio combiné flou

Ainsi, si notre modèle calcule pour un pas de temps donné un ratio combiné en entrée de 100%, le mécanisme d'inférence en déduira que ce ratio combiné appartient à 50% à la classe « ratio moyen » et à 50% à la classe « ratio mauvais ».

b) Taux de couverture du SCR

Comme pour le ratio combiné, nous avons choisi d'utiliser 5 sous-ensembles flous :



Nous avons ensuite déterminé les fonctions d'appartenance associées à ces sous-ensembles flous à dire d'expert. Pour y parvenir, nous nous sommes basés sur les publications de l'ACPR (« Analyse de l'exercice 2014 de préparation à Solvabilité II », graphique 22), sur les restitutions de la place (notamment lors des journées IARD 2016 à Lille qui portaient sur la définition de l'appétence au risque) et sur les plans stratégiques des grands assureurs (la SCOR vise par exemple une fourchette optimale de taux de couverture du SCR de 185% à 220% dans son plan stratégique « Optimal Dynamics »; AXA a une fourchette cible du ratio de Solvabilité II entre 170% et 230% dans son plan stratégique Ambition 2020 « Focus and Transform »).

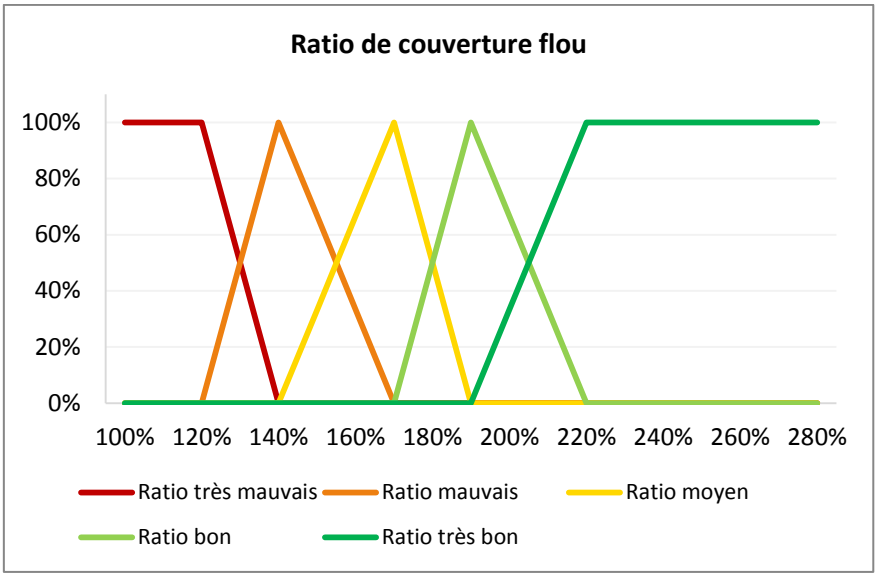


Figure 38 - Fonctions d'appartenance du ratio de couverture flou

Pour un SCR en entrée de 135% par exemple, les fonctions d'appartenance traduiront cette information réelle en degrés d'appartenance flous : 25% au sous-ensemble flou « Ratio très mauvais » et 75% au sous-ensemble flou « Ratio mauvais ».

c) Evolution tarifaire

Enfin, pour les évolutions tarifaires à appliquer, nous avons jugé pertinent de déterminer les 4 classes suivantes :

Afin d'avoir un impact représentatif sur le modèle en fonction de toutes les simulations possibles, nous avons partitionné nos 4 sous-ensembles flous pour aller de -2% (baisse du tarif pour encourager la fidélisation) jusqu'à 8% en cas de scénario catastrophe.

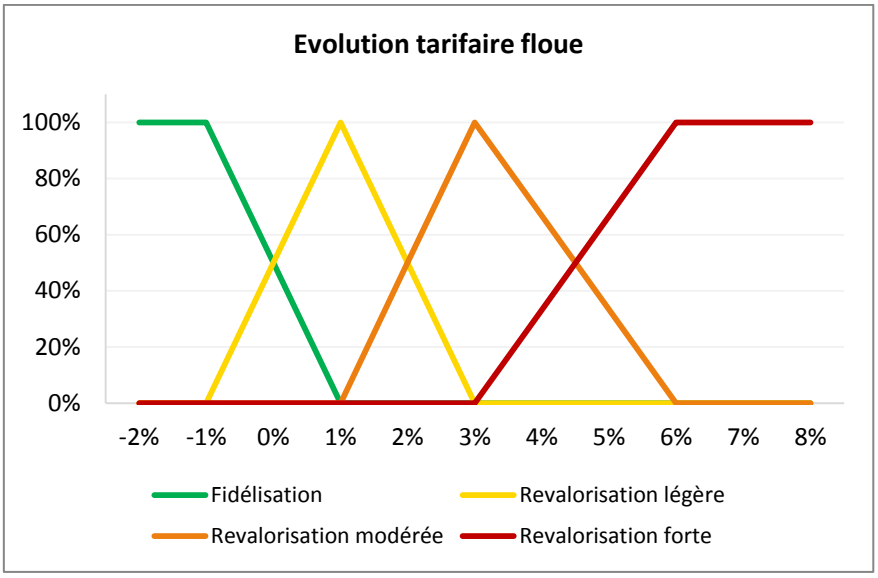


Figure 39 - Fonctions d'appartenance de l'évolution tarifaire floue

Afin de simplifier les étapes à suivre, notamment la défuzzification, nous avons choisi d'utiliser des sous-ensembles flous linéaires par morceaux.

1.2. Règles d'inférence

A l'aide de ces variables floues, nous pouvons définir un ensemble de règles d'inférence qui vont conditionner le processus de contrôle. Après avoir essayé plusieurs calibrages, nous avons déterminé la matrice d'inférence suivante qui nous semblait la plus appropriée et la plus conforme aux décisions d'un top management :

%SCR / %combine	Très mauvais	Mauvais	Moyen	Bon	Très bon
Très bon	Modérée	Légère	Légère	Fidélisation	Fidélisation
Bon	Modérée	Modérée	Légère	Légère	Fidélisation
Moyen	Modérée	Modérée	Modérée	Légère	Légère
Mauvais	Forte	Modérée	Modérée	Modérée	Légère
Très mauvais	Forte	Forte	Modérée	Modérée	Modérée

Figure 40 - Matrice d'inférence de notre mécanisme de commande floue

A l'aide de cette matrice d'inférence, 25 règles d'inférence ressortent. Elles sont de la forme : SI … ET/OU … ALORS …

Par exemple, pour mieux comprendre, nous pouvons illustrer la première règle de la façon suivante :

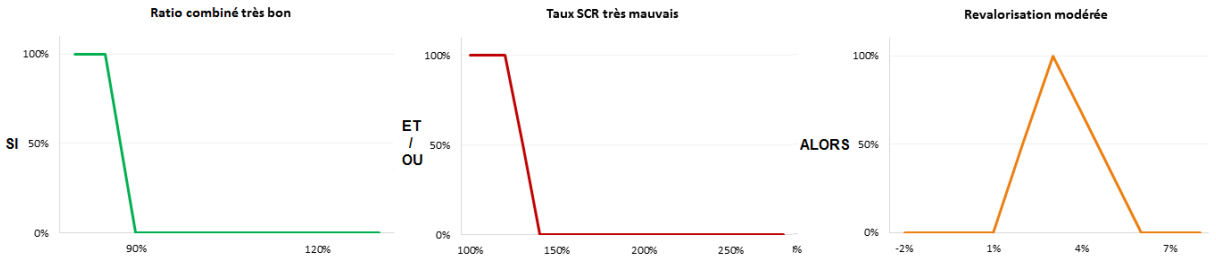


Figure 41 - Exemple de règle floue implémentée dans notre modèle

2. Le mécanisme d'inférence

Une fois les règles d'inférence construites, la deuxième étape de la commande floue consiste à déterminer les différents points d'agrégation. Nous utilisons le mécanisme d'inférence exposé dans ce mémoire, à savoir celui de Mamdani.

2.1. Agrégation des prémisses

Pour rappel, il s'agit de déterminer les conditions associées aux règles d'inférence, l'union étant caractérisée par l'opérateur de maximisation et l'intersection par la minimisation.

Dans notre modèle, les deux opérateurs sont possibles. Cependant, il nous a semblé plus pertinent d'utiliser l'intersection plutôt que l'union. En effet, en ne déclenchant que les règles où les deux prémisses se réalisent plutôt que de déclencher toutes les règles où au moins une des prémisses est vérifiée, le modèle est plus restrictif. Ainsi, chaque règle déclenchée aura plus de poids et un comportement plus marqué donc des résultats qui diffèrent plus nettement d'une année à l'autre en fonction de l'évolution du ratio combiné et du taux de couverture.

L'agrégation de nos deux prémisses sera donc caractérisée par l'opérateur de minimisation, d'où la formule :

$$\mu_{prémisses}(x_i, y_i) = \min\left(\mu_{combiné}(x_i), \mu_{SCR}(y_i)\right),$$

avec x_i le ratio combiné déduit du modèle et y_i le ratio de couverture, pour un pas de temps donné.

2.2. Activation

Les 25 règles énoncées ci-dessus vont suivre la relation d'inférence de Mamdani :

$$\mu'_{Tarif}(evol_tarifaire) = \min(\mu_{prémisses}(x_i, y_i), \mu_{Tarif}(evol_tarifaire))$$

2.3. Agrégation des conclusions

Pour rappel, nous obtenons notre fonction d'appartenance finale en prenant, pour chaque taux d'évolution tarifaire de notre intervalle, le maximum des fonctions d'appartenance calculées après l'activation.

Pour les 25 règles *i* :

$$\mu_{finale}(evol_tarifaire) = \max_i(\mu'_{Tarif}(evol_tarifaire))$$

Pour mieux appréhender le mécanisme développé ci-dessus, nous développons un exemple.
Considérons les variables d'entrées suivantes :

- Un ratio combiné x_i de 87,5%,
- Un ratio de couverture du SCR y_i de 135%.

Le ratio combiné appartiendra donc à 50% à la classe « Ratio très bon » et 50% à la classe « Ratio bon ». Le ratio de couverture sera lui à 25% dans la classe « Ratio très mauvais » et à 75% dans la classe « Ratio mauvais ». Ainsi, puisqu'il faut que les 2 variables soient vérifiées pour déclencher une règle, seules 4 des 25 règles d'inférence vont impacter le mécanisme d'activation.

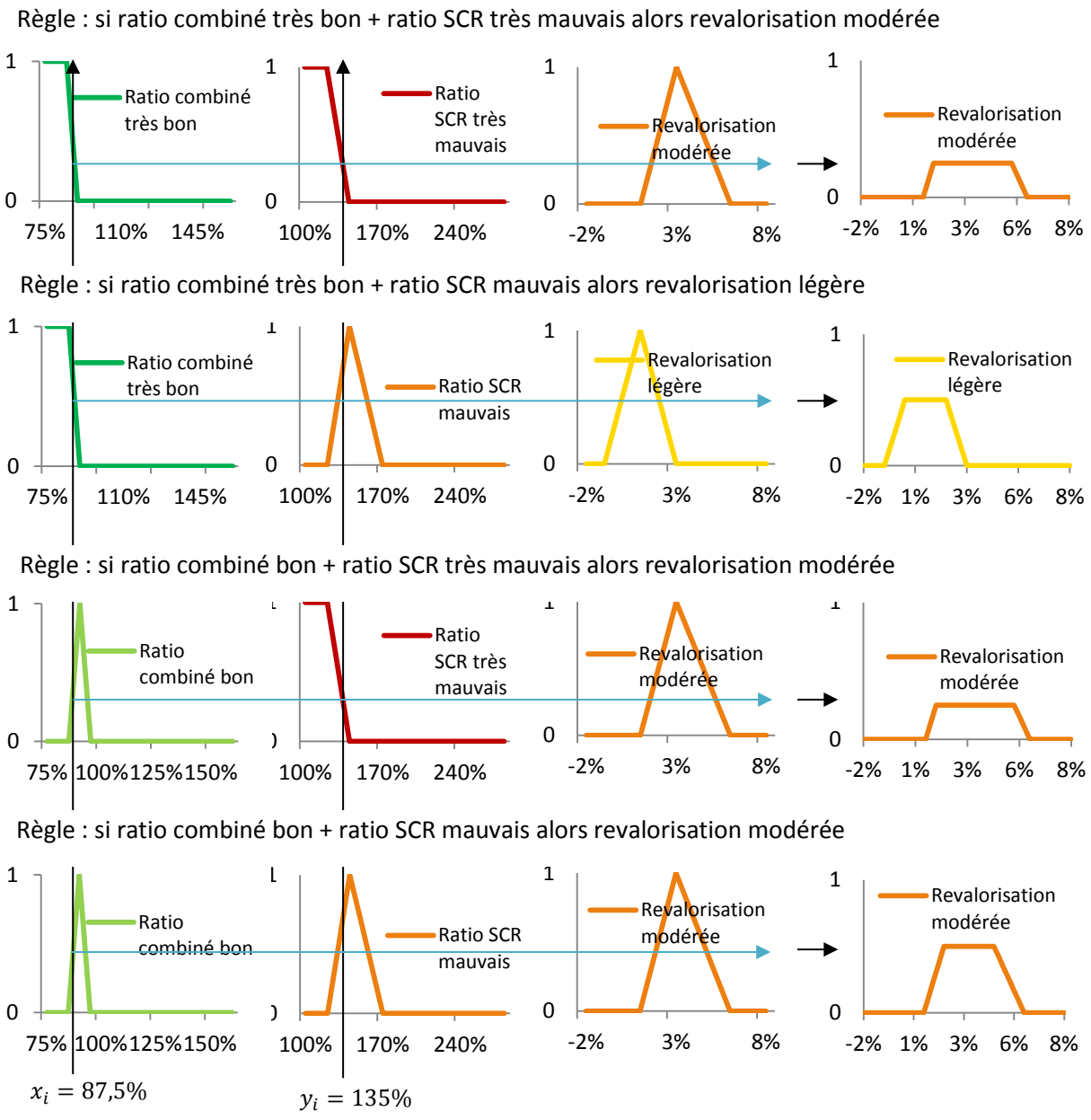


Figure 42 - Exemple de mécanisme d'inférence

Pour finir, l'agrégation des conclusions permet de trouver $\mu_{finale}(evol_tarifaire)$:

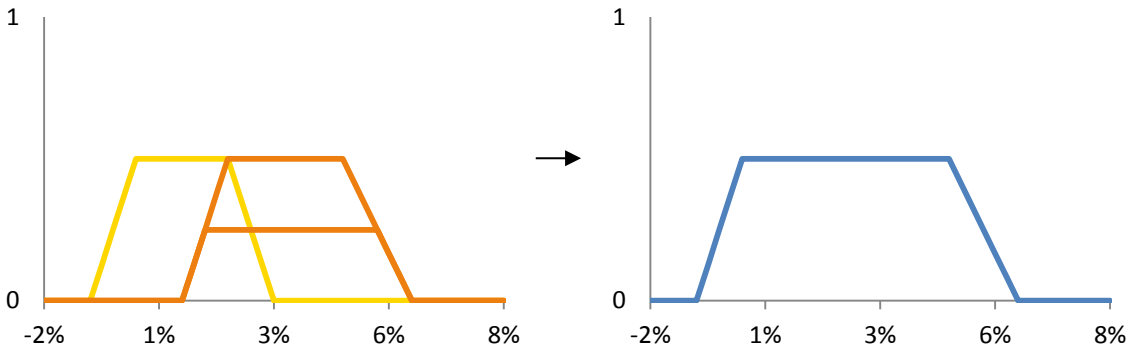


Figure 43 - Agrégation des conclusions

3. La défuzzification

Enfin, la dernière étape va nous permettre d'extraire une valeur réelle, à partir du sous-ensemble flou déterminé dans la deuxième étape. Comme nous avons pu le voir auparavant, il existe plusieurs méthodes de défuzzification qui peuvent amener à des résultats différents.

3.1. Méthode du premier maximum

Par exemple, si nous utilisons la méthode du premier maximum :

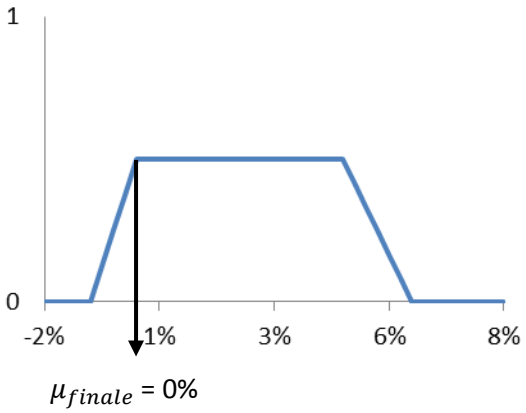


Figure 44 - Défuzzification : méthode du premier maximum

Le taux d'évolution tarifaire serait donc nul.

3.2. Méthode de la moyenne des maximums

Si nous prenons la deuxième méthode de moyenne des maximums :

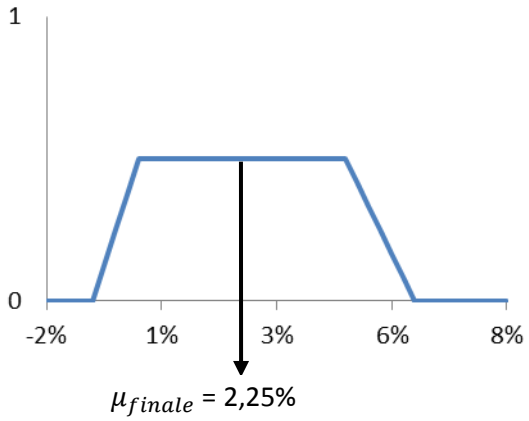


Figure 45 - Défuzzification : méthode de la moyenne des maximums

Le résultat serait donc beaucoup plus important, avec une revalorisation tarifaire de 2,25%.

3.3. Méthode du centre de gravité

Cependant, si nous prenons la dernière méthode qui consiste à déterminer le centre de gravité :

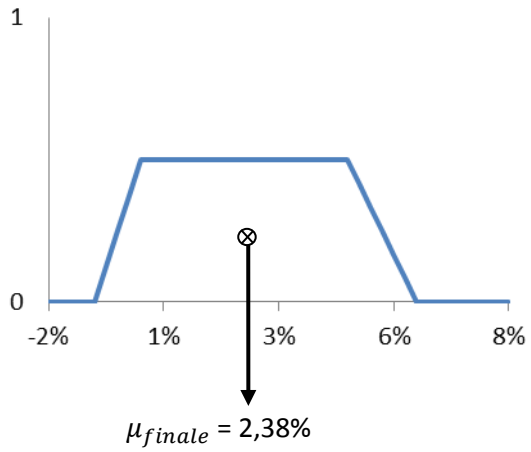


Figure 46 - Défuzzification : méthode du centre de gravité

Nous trouvons un taux d'évolution tarifaire de 2,38%.

Comme évoqué dans la partie 2, la dernière méthode du centre de gravité nous paraît être la méthode la plus pertinente dans la représentation de cette étape de défuzzification puisque qu'elle prend en compte la totalité de la fonction d'appartenance finale.

4. Ensemble des décisions obtenu en logique floue

En effectuant ces précédentes étapes sur l'ensemble de nos intervalles flous, nous obtenons le taux de revalorisation suivant, en fonction du ratio combiné et du taux de couverture du SCR :

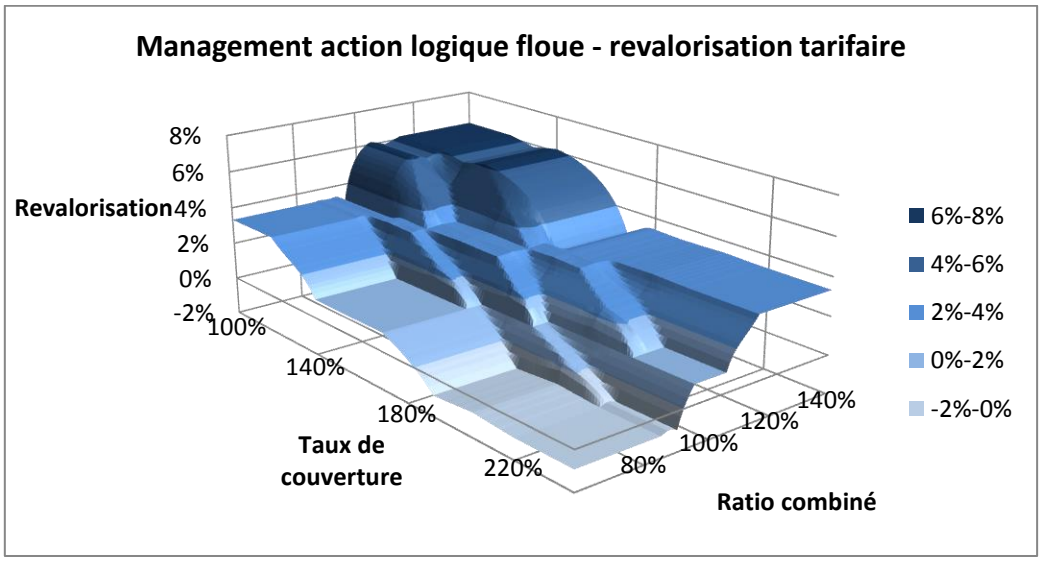


Figure 47 - Ensemble des décisions pour le management action de revalorisation tarifaire en logique floue

Chapitre 3 : La modélisation en logique classique

Le paramétrage du management action de revalorisation tarifaire a également été réalisé en logique classique, c'est-à-dire en logique binaire : une valeur ne peut appartenir qu'à un seul ensemble, et non à plusieurs selon un degré d'appartenance comme en logique floue.

1. La définition des différentes classes d'appartenance

Afin de réaliser ce scénario dit « classique » et d'être sur des bases comparables au scénario avec logique floue, nous avons utilisé les mêmes classes que celles définies pour la logique floue. Puisqu'une valeur ne peut appartenir qu'à un seul ensemble, les bornes des classes ont été définies selon le plus grand degré d'appartenance.

Classe de Ratio combiné

	Borne inf.	Borne sup.
Très bon	0,0%	87,5%
Bon	87,5%	92,5%
Moyen	92,5%	100%
Mauvais	100%	110%
Très mauvais	110%	160%

Classe de Taux de couverture du SCR

	Borne inf.	Borne sup.
Très bon	205%	280%
Bon	180%	205%
Moyen	155%	180%
Mauvais	130%	155%
Très mauvais	0%	130%

Figure 48 - Classes définies pour le management action de revalorisation tarifaire en logique classique

La revalorisation tarifaire dans la logique floue est également définie selon des classes. En binaire, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3 de la partie 2 sur l'apport de la logique floue, il n'est pas aisé de croiser deux variables comme ici (le ratio combiné et le taux de couverture du SCR) et d'appliquer une revalorisation qui diffère selon les valeurs des variables en entrée. La définition d'une revalorisation variable en fonction des valeurs en entrée est complexe à déterminer, à justifier et à mettre à jour.

Par exemple, en logique floue, lorsque le ratio combiné et le taux de couverture sont moyens, la revalorisation tarifaire appliquée est modérée. Mais cette revalorisation n'est pas définie formellement (avec une seule valeur) mais à l'aide d'une classe. La valeur de sortie (le pourcentage de revalorisation tarifaire que l'on va appliquer) est calculée au sein de la logique floue lors de la défuzzification et selon la valeur exacte de ratio combiné et de taux de couverture en entrée.

En logique classique, nous pourrions définir pour chaque couple en entrée (ratio combiné et taux de couverture), la revalorisation à appliquer. Mais le travail serait compliqué à réaliser et à justifier.

Comme pour le ratio combiné ou le taux de couverture du SCR, les bornes des classes ont été définies selon le plus grand degré d'appartenance.

Classe de Revalorisation tarifaire

	Borne inf.	Borne sup.	valeur retenue
Fidélisation	-2%	0%	-1%
légère	0%	2%	1%
modérée	2%	4,5%	3,25%
forte	4,5%	8%	6,25%

Figure 49 – Classes définies pour le management action de revalorisation tarifaire en logique classique (2)

2. La définition de la matrice de décisions

En logique floue, une matrice d'inférence a été définie afin de croiser les deux variables en entrée du modèle. Dans l'objectif d'être sur des bases comparables, nous utilisons cette matrice pour définir notre matrice de décisions en logique classique. Comme présenté auparavant, la décision sera par contre unique (alors qu'elle est variable en logique floue) :

%SCR / %combiné	Très mauvais	Mauvais	Moyen	Bon	Très bon
Très bon	3,25%	1%	1%	-1%	-1%
Bon	3,25%	3,25%	1%	1%	-1%
Moyen	3,25%	3,25%	3,25%	1%	1%
Mauvais	6,25%	3,25%	3,25%	3,25%	1%
Très mauvais	6,25%	6,25%	3,25%	3,25%	3,25%

Figure 50 - Matrice de décisions en logique classique

3. L'ensemble des décisions obtenu en logique classique

Nous obtenons le taux de revalorisation suivant, en fonction du ratio combiné et du taux de couverture du SCR :

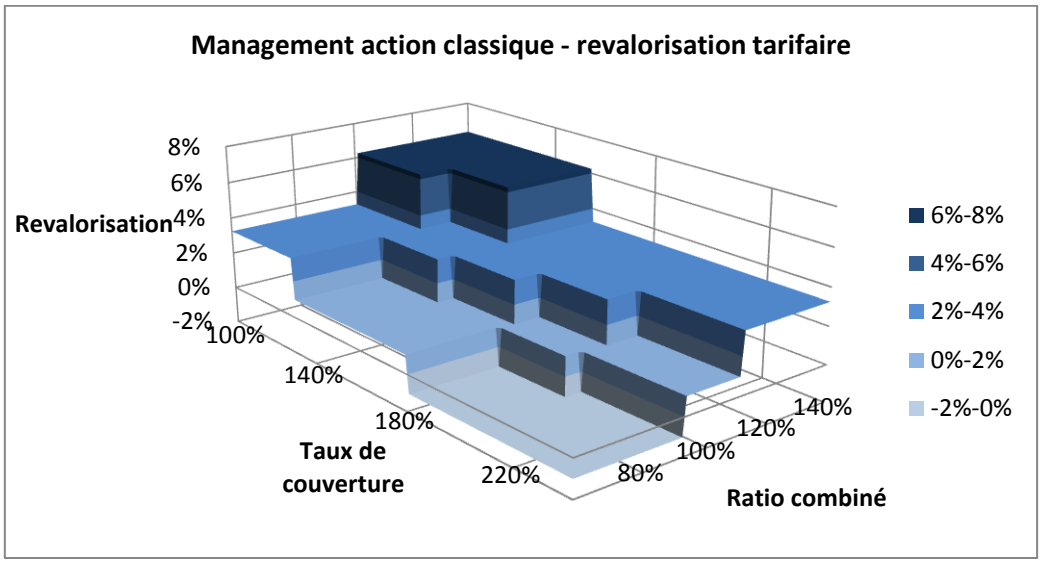


Figure 51 - Ensemble des décisions pour le management action de revalorisation tarifaire en logique classique

Chapitre 4 : La comparaison des deux implémentations

Le management action a été paramétré en logique classique ou en logique floue. Les ensembles de décisions de chaque logique ont été générés. Pour y parvenir, nous avons calculé pour chaque couple de ratio combiné et de taux de couverture du SCR, le taux de revalorisation tarifaire. Nous obtenons ainsi une grille précisant le taux de revalorisation tarifaire à prendre en compte, en fonction d'un ratio combiné allant de 60% à 140% et d'un taux de couverture du SCR allant de 100% à 240%.

1. La comparaison de l'ensemble des décisions entre les deux logiques

Ces graphiques ont été présentés dans les chapitres précédents. A titre de rappel, nous avons l'ensemble de décisions suivant en logique floue et en logique classique :

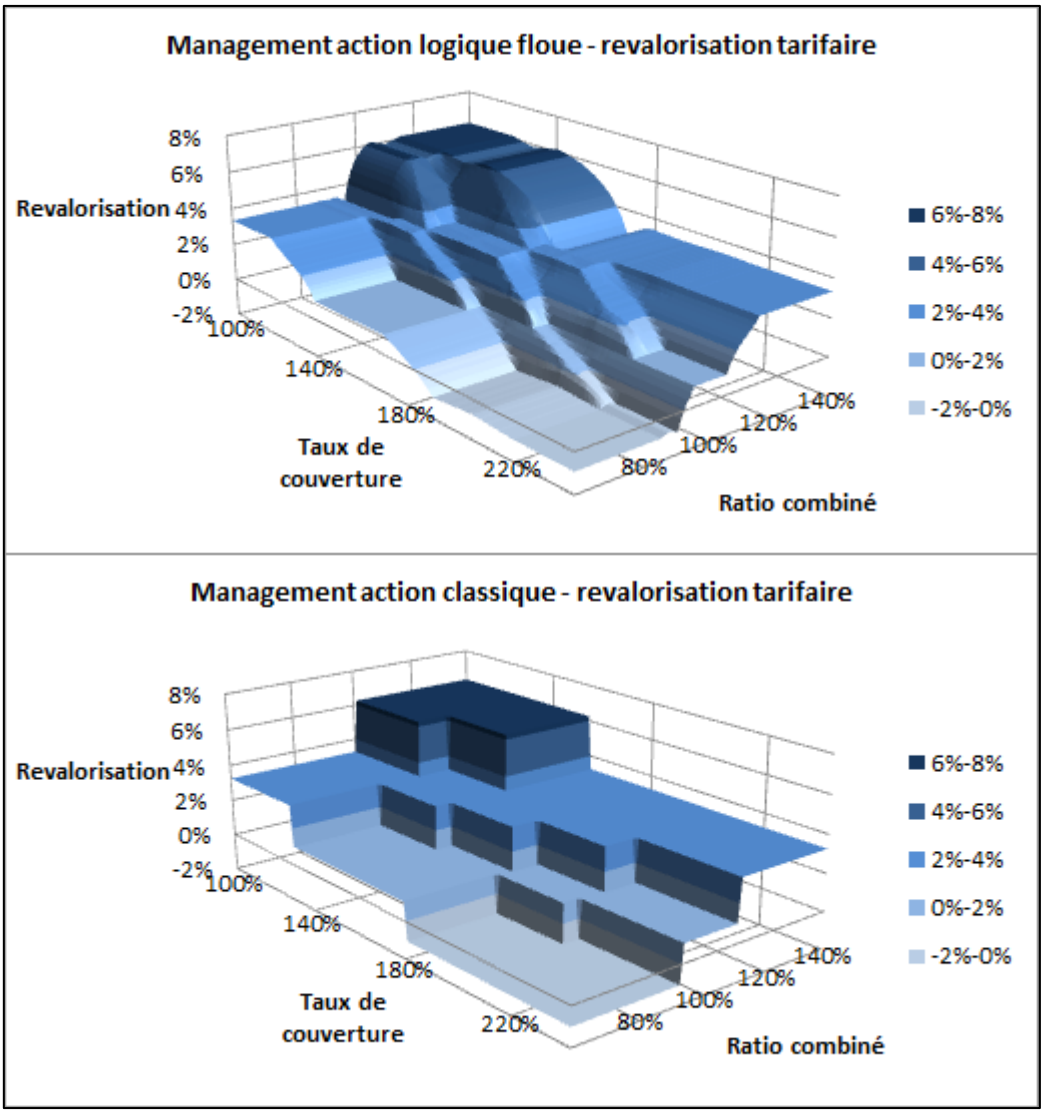


Figure 52 - Comparaison de l'ensemble des décisions entre la logique floue et la logique classique

Le management action a été paramétré en logique classique afin d'être relativement proche de celui réalisé en logique floue et d'être sur des bases comparables. Il convient d'observer que le paramétrage réalisé en logique classique est acceptable, la revalorisation tarifaire moyenne sur cet ensemble étant de 2,59% contre 2,69% en logique floue, et l'ensemble des décisions entre les deux logiques ayant la même allure.

Comme nous pouvons le voir, l'ensemble des décisions en logique classique présente des cassures, des sauts sur le taux de revalorisation. Ces cassures sont générées lors du passage d'une classe à une autre. En logique floue, le système d'inférence nous permet d'avoir des décisions sans discontinuité et non linéaires.

On peut également noter que les revalorisations minimale ou maximale en logique floue ne correspondent pas exactement au minimum ou au maximum utilisés pour paramétrer le management action en logique classique (-0,92% contre -1% et 6,15% contre 6,25%). Cela s'explique puisque nous avons défini ces valeurs en logique classique en faisant la moyenne entre les bornes (entre -2% et 0% pour le minimal et 4,5% et 8% pour le maximal) alors que dans notre modélisation en logique floue, la valeur maximale est limitée au centre de gravité des fonctions d'appartenance. Les revalorisations minimale et maximale sont donc déterminées par le centre de gravité de la fonction d'appartenance « fidélisation » pour le minimum et « forte » pour le maximum lorsque la matrice d'inférence entraîne l'activation de ces fonctions seulement.

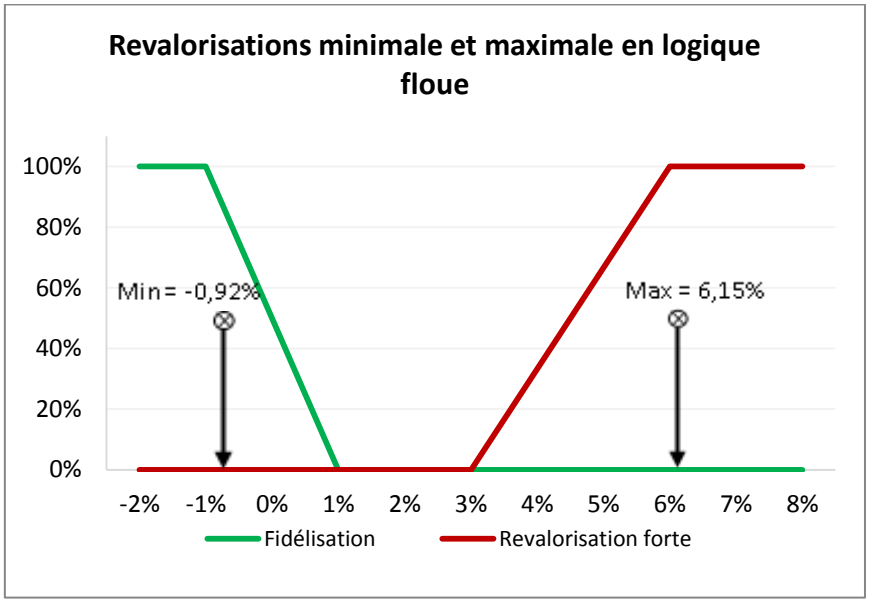


Figure 53 - Détermination du taux de revalorisations minimale et maximale en logique floue

Ces valeurs minimales et maximales peuvent être modifiées en augmentant le champ de revalorisation. Ici, nous avons déterminé que les revalorisations s'effectuaient entre -2% au moins et 8% au plus.

2. La comparaison de l'ensemble des décisions sur la tranche 140-155% de taux de couverture du SCR

Nous pouvons illustrer plus nettement ces phénomènes de cassure et de linéarité en comparant des tranches de ces ensembles de décisions en logique floue et en logique classique. Observer en tranches plutôt que sur l'ensemble des décisions permet de faciliter la lecture du graphique et sa compréhension.

Pour la tranche de taux de couverture du SCR allant de 140% à 155%, nous obtenons l'ensemble des décisions suivant :

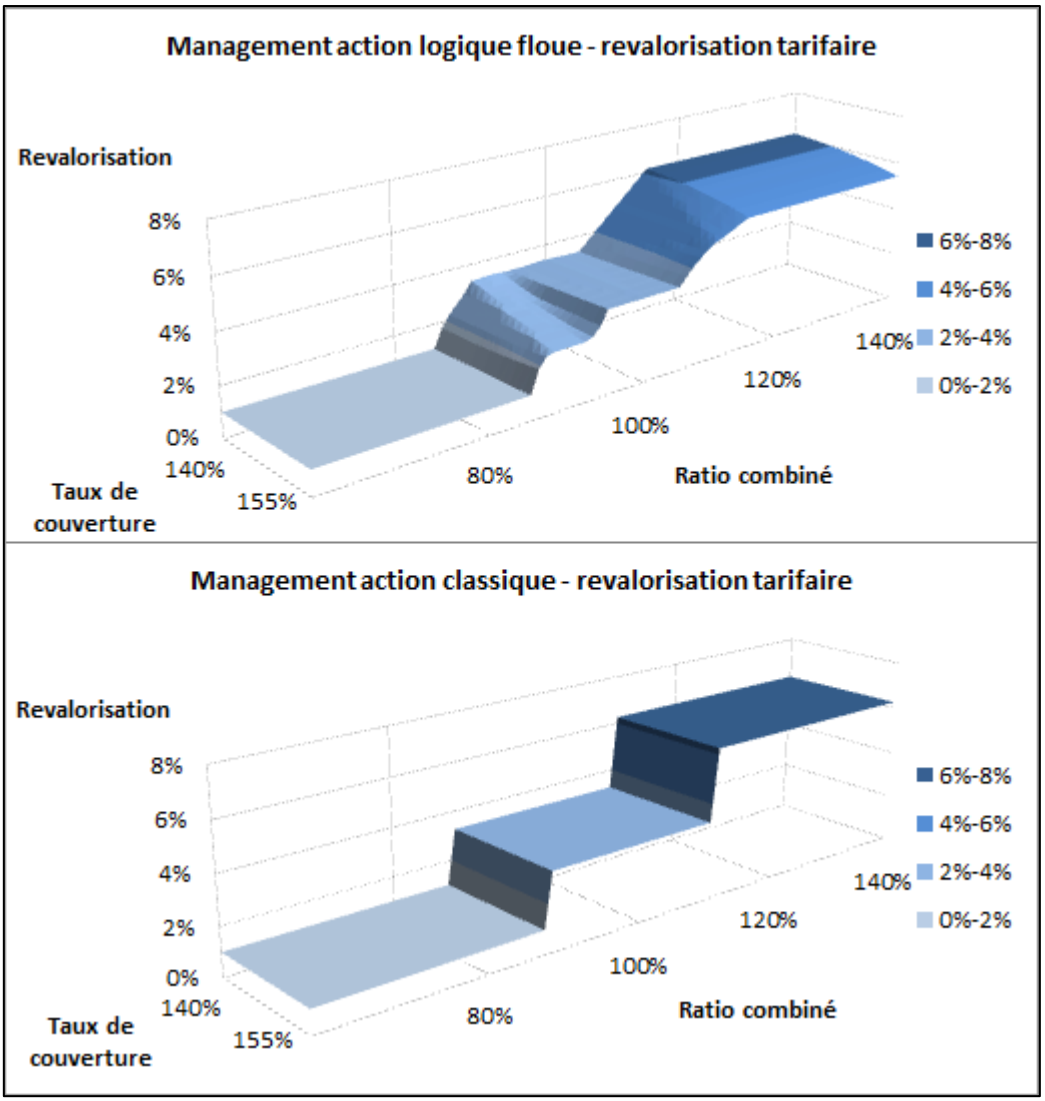


Figure 54 - Ensemble des décisions sur la tranche 140%-160% du taux de couverture du SCR

Sur cette tranche, le taux de couverture du SCR est jugée « mauvais ». La revalorisation tarifaire moyenne est de 3,47% en logique floue et de 3,58% en logique classique.

Nous observons très nettement les cassures provoquées par le passage d'une classe de ratio combiné à l'autre en logique classique qui provoque des « marches » sur le taux de revalorisation tarifaire.

Ces marches apparaissent lors du changement de classe du ratio combiné. Par exemple, pour un ratio combiné qui passe de 110% à 111% (passage de la classe « mauvais » à « très mauvais »), le taux de revalorisation passe de 3,25% à 6,25% d'un coup et est identique quel que soit le taux de couverture du SCR compris entre 140% et 155%. Ce n'est pas le cas en logique floue. Le taux de revalorisation passe de manière progressive de 3,3% à 6,15% sur l'intervalle de ratio combiné allant de 95% à 115%. Qui plus est, le taux n'est pas identique quel que soit le taux de couverture du SCR. Plus le taux de couverture est important, plus l'augmentation tarifaire est atténuée en logique floue. Dans notre cas précis, l'atténuation va jusqu'à 74 points (de 6,15% à 5,41%) sur le plancher observé en logique classique pour les ratios combinés supérieurs à 115%.

Nous observons le même phénomène autour de 87,5% de ratio combiné, lorsque ce ratio passe de « très bon » à « bon ». Nous ne l'observons pas sur le passage de « bon » à « moyen » et de « moyen » à « mauvais » puisque la règle de revalorisation pour un taux de couverture « mauvais » est identique entre ces trois classes de ratios combinés.

%SCR / %combiné	Mauvais
Très bon	1%
Bon	3,25%
Moyen	3,25%
Mauvais	3,25%
Très mauvais	6,25%

Figure 55 - Matrice de décisions pour un taux de couverture du SCR « mauvais » en logique classique

Ces observations confortent la puissance de la logique floue et sa capacité à modéliser l'incertitude dans le choix du taux de revalorisation et à modéliser le comportement humain. La logique floue apporte une nuance naturelle selon la proximité de la classe suivante.

3. La comparaison de l'ensemble des décisions sur la tranche 190-220% de taux de couverture du SCR

Nous nous plaçons maintenant volontairement à cheval entre deux classes de taux de couverture du SCR, sur la tranche 190-220%. Le taux de couverture du SCR est considéré à la fois « bon » et « très

bon » en logique floue alors qu'en logique classique, il est « bon » avant de devenir « très bon » à partir de 205%.

Pour la tranche de taux de couverture du SCR allant de 190% à 220%, nous obtenons l'ensemble des décisions suivant :

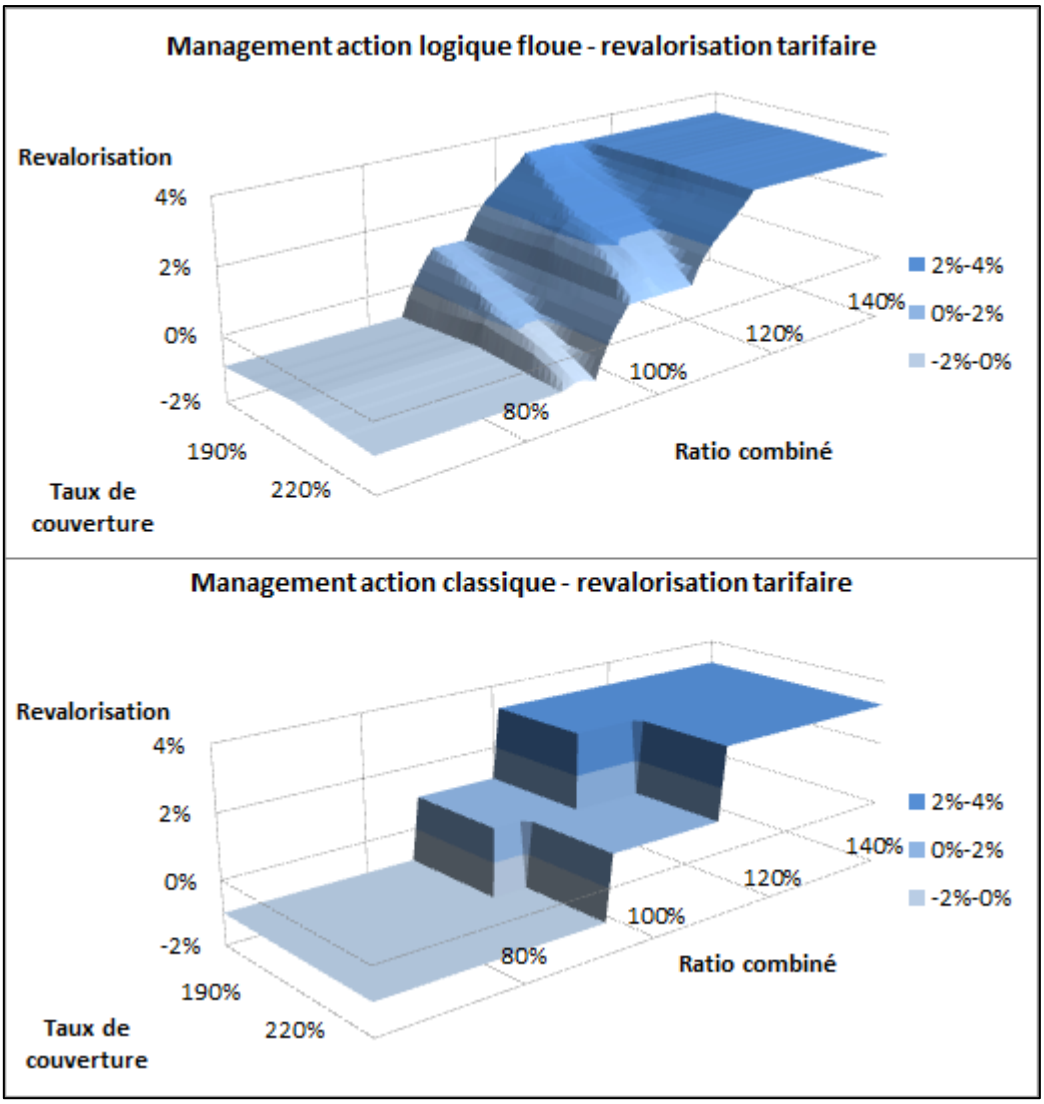


Figure 56 - Ensemble des décisions sur la tranche 190%-220% du taux de couverture du SCR

Sur cette tranche, la revalorisation tarifaire moyenne est de 1,39% en logique floue et de 1,23% en logique classique.

Comme sur l'exemple précédent, nous observons nettement le passage d'une classe à une autre en logique classique, que ce soit sur le taux de couverture du SCR (de la classe « bon » à la classe « très bon »), visible en horizontal, ou sur le ratio combiné (entre toutes les classes), visible en vertical.

L'observation de ces « marches » décalées est due à la matrice de décisions, qui applique des décisions différentes en fonction du taux de couverture du SCR « bon » ou « très bon ».

%SCR / %combiné	Bon	Très bon
Très bon	-1%	-1%
Bon	1%	-1%
Moyen	1%	1%
Mauvais	3,25%	1%
Très mauvais	3,25%	3,25%

Figure 57 - Matrice de décisions pour un taux de couverture du SCR « bon » ou « très bon » en logique classique

Au contraire, en logique floue, ce phénomène est atténué par une non-linéarisation quel que soit l'axe, à l'horizontale ou en verticale. L'apport des spécificités de la logique floue permet de transformer ces « marches » en une représentation proche d'une « montagne ».

Partie 5 : Analyse des résultats du modèle et de l'apport de la logique floue

Le modèle d'analyse prospective ainsi développé a été utilisé afin de projeter la situation d'un assureur non-vie automobile sur les 5 prochaines années. Cette projection est utilisée dans le cadre d'un exercice ORSA afin de définir un besoin global de solvabilité.

Le modèle utilise une approche stochastique et génère 1000 simulations d'évolution de notre compagnie d'assurance. Une approche simplifiée par des scénarios déterministes est acceptable dans le cadre d'un exercice ORSA et plus facile à mettre en place que des méthodes à base de génération de simulations stochastiques monde réel. Nous avons cependant fait le choix d'utiliser un modèle stochastique afin d'être en mesure d'évaluer le risque supporté par l'assureur à différents niveaux de risque et afin d'observer la distribution complète des résultats possibles. Qui plus est, cette solution ne nous oblige pas à déterminer des scénarios prédéfinis et permet de balayer toutes les possibilités d'après la volatilité observée sur notre actif et notre passif.

L'objectif de notre application est d'illustrer l'apport de la logique floue dans la modélisation des management actions. Pour ce faire, nous avons projeté la situation de l'assureur selon 3 scénarios : un scénario central (sans management action), un scénario « management action classique » avec l'utilisation d'un management action défini selon un seuil et une intervention déterminés, et un scénario « management action flou », avec l'utilisation de la logique floue pour modéliser les interventions tarifaires selon différentes situations.

Chapitre 1 : Les données de projection du modèle

1. L'origine des données et la qualité des données

Dans le cadre de ce mémoire, l'outil développé modélise la situation d'un assureur automobile proposant une garantie dommages et une garantie responsabilité civile. Les données utilisées proviennent d'un assureur non-vie. Il n'est pas exclusivement un assureur automobile et opère sur d'autres lignes d'activité. Nous n'avons retenu que les données provenant des deux branches modélisées : la ligne d'activité « autre assurance des véhicules à moteur » et la ligne d'activité « assurance de responsabilité civile automobile »).

Afin de garantir la confidentialité de l'assureur, ces données ont été anonymisées. Pour ce faire, elles ont été soit simulées à partir de la volatilité observée sur les données réelles ou alors transformées en conservant les proportions observées. Lorsque des traitements d'anonymisation ont été réalisés sur certains postes du bilan, ils sont présentés dans les paragraphes suivants.

La qualité des données sources a été évaluée. Les données sont jugées de qualité au sens de Solvabilité II (appropriées, exactes et exhaustives). L'assureur a mis en place, conformément à la directive Solvabilité II, une politique et un système de gouvernance de la qualité des données. Des contrôles ont été mis en place à chaque étape du processus de transformation des données en variables. La qualité des données d'actif et de passif a donc été validée dans le cadre de cet exercice. De plus, la qualité des données utilisées pour le calcul des provisions (nombre de contrats, montant de sinistres, montant de primes, taux de chargement, taux de frais, etc.) a été validée dans le cadre de l'exercice annuel de la fonction actuarielle.

Nous ne disposions pas de certaines données (comme la répartition de l'actif ou le montant de fonds propres alloué à ces deux branches). Les données manquantes ont été déterminées conformément aux observations de l'ACPR dans son rapport annuel « Analyses et synthèses : la situation des principaux organismes d'assurance» en utilisant les versions de 2014 (publiée en 2015) et 2015 (publiée en 2016).

2. Les données de l'actif

2.1. Répartition de l'actif

Nous disposions du portefeuille obligataire de l'assureur. Nous n'avions cependant aucune information sur le reste de son portefeuille financier. La répartition de l'actif de l'assureur a été simplifiée entre trois types d'actifs financiers (actions, obligations, actifs monétaires) et conformément aux pratiques du marché. Cette répartition a été considérée comme l'allocation d'actifs stratégique cible de l'assureur : 70% d'obligations, 20% d'actions, 10% de monétaire.

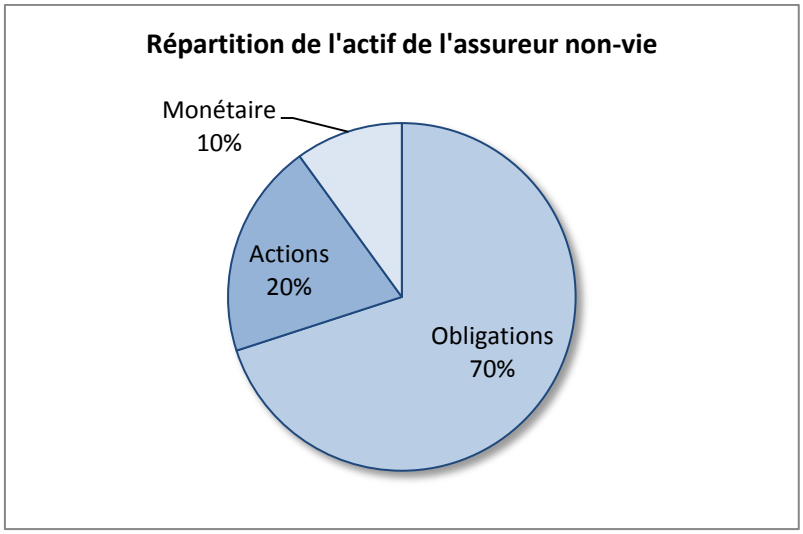


Figure 58 - Répartition de l'actif de l'assureur non-vie

2.2. Duration moyenne du portefeuille obligataire

Le portefeuille obligataire de l'assureur n'est pas scindé par ligne d'activité et nous ne disposons donc pas d'un montant d'obligations propre à la branche automobile. Nous avons considéré le portefeuille d'obligations dans son ensemble (en ne conservant que les obligations à taux fixe par souci de simplification des calculs) et aligné ce montant sur celui du passif. La duration moyenne ainsi observée pour le portefeuille obligataire est de 6,2 années.

2.3. Réalisation des plus-values et frais de gestion des placements

Chaque année, l'assureur réalise une partie de ses plus-values. Cela lui permet de dégager un résultat financier annuel (en plus des coupons reçus sur le portefeuille obligataire). Le taux de réalisation des plus-values a été fixé à 20% pour les actions et à 50% pour le monétaire.

Les frais de gestion des placements sont de 0,12%.

3. Les données du passif

3.1. Données des règlements passés pour le calcul des provisions

L'historique des règlements par ligne d'activité et par année de survenance a été utilisé afin de constituer des triangles de règlement, en fonction de l'année de survenance et de l'année de règlement. Ces triangles nous servent à calculer notre montant de provision à chaque pas de projection.

Afin d'anonymiser ces données, les triangles du modèle ont été simulés à partir des triangles réels : la cadence de règlement observée et la croissance des règlements au fil des années de survenance ont été conservées.

Les montants réglés au bout d'un an pour chaque année de survenance ont été modifiés en conservant la croissance observée. Les règlements suivants ont été simulés à partir de la cadence de règlement. Ils sont simulés en tirant un facteur de développement pour chaque montant.

Pour ce faire, nous avons considéré que les facteurs de développement suivaient une loi normale, de moyenne le facteur de développement réel, et de variance la volatilité observée sur ces facteurs de développement.

Nous avons la formule suivante, pour chaque année de développement *i* :

$$f_i^{estimé} \sim \mathcal{N}\left(f_i^{réel}, \sigma(f_i^{réel})\right)$$

La cadence de règlement observée est plus rapide pour les sinistres dommages. En moyenne, 94% des sinistres sont réglés au bout de 3 ans sur cette branche (contre 82% en RC).

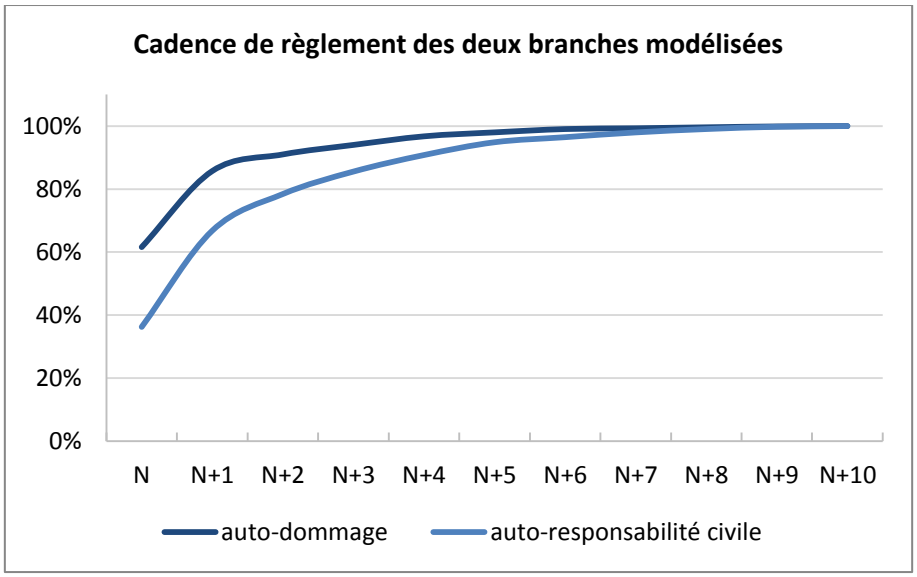


Figure 59 - Cadence de règlement des deux branches modélisées

3.2. Paramétrage des lois de fréquence et de coût

Nous considérons arbitrairement que chaque branche possède 10 000 contrats. Ce nombre permet de fixer le nombre de tirages à effectuer pour simuler la sinistralité. Plus le nombre de contrats simulés est élevé, plus la loi des grands nombres est respectée mais plus le temps de calcul est complexe.

Les lois de fréquence et de coût utilisées pour simuler la sinistralité future ont été paramétrées pour chaque branche. La sinistralité ultime des années de survenance futures est simulée selon une approche fréquence et coût.

Pour rappel, nous avons choisi la loi de Poisson pour la loi de fréquence et la loi log-normale pour la loi de coût. La loi de Poisson a été paramétrée à partir de la fréquence observée sur chaque branche. La loi log-normale a été calibrée en fonction du nouveau coût moyen (avec les 10 000 contrats et suite à l'anonymisation des données) observé sur chaque branche et de la volatilité observée sur le portefeuille pour chaque branche.

3.3. Montant de primes, de frais et ratio combiné

Les montants de primes ont été modifiés proportionnellement aux montants de sinistres anonymisés, afin de conserver le ratio combiné observé. Les taux de frais utilisés correspondent aux taux observés en 2015. Dans notre modèle, nous n'avons pas considéré de frais d'acquisition. Les frais de gestion des contrats s'élèvent à 8,30% des primes sur la branche dommages automobile et à 11,12% des primes sur la branche RC automobile. Le taux de frais de gestion des sinistres est de 11,09% des prestations.

Le ratio combiné est défini par le rapport entre les charges de prestations (sinistres payés, frais de gestion des sinistres et provisionnement) augmentées des frais affectés (frais d'administration) et les primes de l'exercice (primes acquises). C'est un ratio tous exercices de survenance confondus.

En assurance non-vie automobile, le ratio combiné du marché est supérieur à 100%. Cela signifie que le résultat des assureurs est tributaire des produits financiers techniques et du résultat de réassurance.

Dans notre exemple, le ratio combiné est toutefois légèrement inférieur à 100%. Au global, le ratio combiné observé au début de la simulation s'élève à 95,3%. Il est de 91,9% sur la branche dommages automobile et de 99,0% sur la branche responsabilité civile automobile. Le ratio combiné observé au global est au même niveau que les ratios combinés observés pour les principaux assureurs automobiles au premier semestre 2016 (AXA est à 96%, Allianz à 94,9%, Generali à 92,3%, Crédit Agricole Assurance à 95,8% et AVIVA à 97,5%). Les chiffres ont été constatés dans leur publication de résultats semestriels respective.

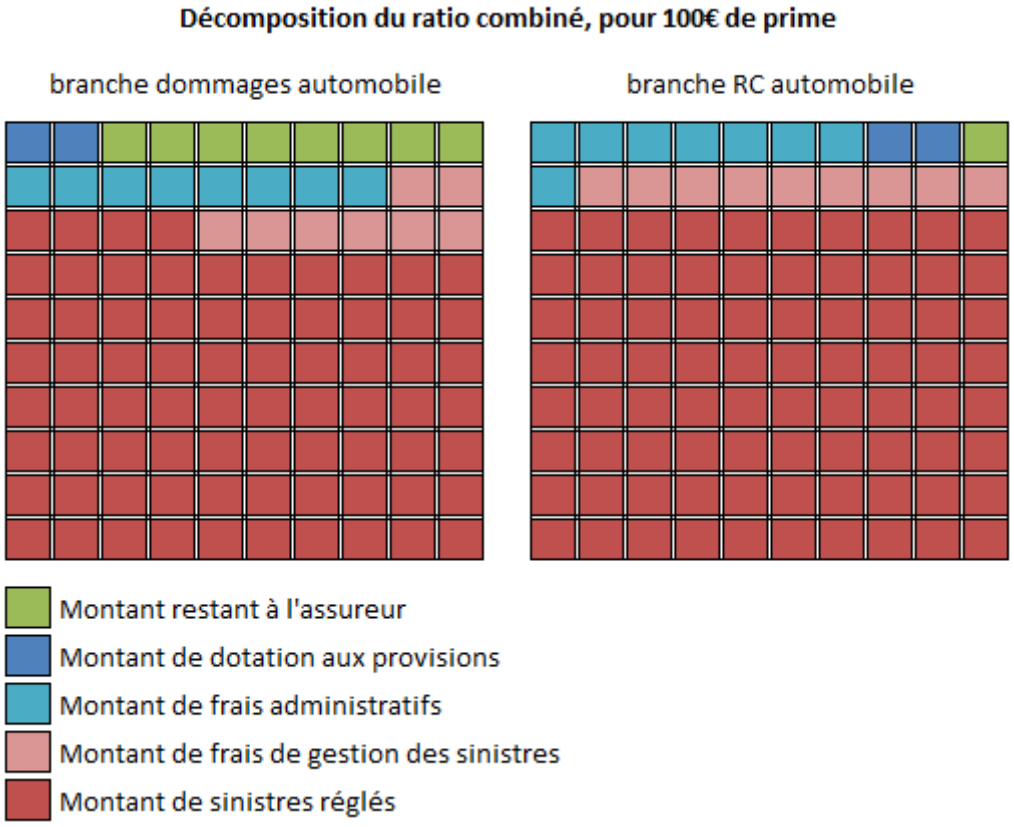


Figure 60 - Ratio combiné par branche modélisée

73,5% des primes acquises de l'année servent à régler des sinistres (quelle que soit l'année de survenance) en dommages automobile contre 79,6% en responsabilité civile automobile.

En dommages, pour 100€ de primes, 74€ sont donc utilisés pour les règlements de l'année, 8€ pour les frais de gestion des sinistres, 8€ pour les frais administratifs et 2€ pour la dotation de provisions. Il reste à la fin de l'année 8€ de résultat à l'assureur sur la branche dommages.

En responsabilité civile, pour 100€ de primes, 80€ sont utilisés pour les règlements de l'année, 9€ pour les frais de gestion des sinistres, 8€ pour les frais administratifs et 2€ pour la dotation de provisions. Il reste à la fin de l'année 1€ de résultat à l'assureur sur la branche dommages.

3.4. Montant de fonds propres

Nous disposons du montant de fonds propres global (toutes branches confondues). Nous n'avons pas de montant de fonds propres correspondant à la branche automobile spécifiquement.

Nous avons déterminé le montant de fonds propres de telle sorte que le taux de couverture du SCR soit de 184%. Ce montant correspond au taux de couverture observé pour les principaux assureurs automobile au premier semestre 2016 (AXA est à 197%, Allianz à 186%, Generali à 188%, Crédit Agricole Assurance à 178% et AVIVA à 174%). Les chiffres ont été constatés dans leur publication de résultats semestriels respective.

3.5. Taux de croissance du portefeuille

Le taux de croissance de chaque branche est fixé conformément à la politique stratégique de l'entreprise. Il est identique pour les deux branches : 3%.

Chapitre 2 : La situation initiale de l'assureur

Au début de la projection, à fin 2015, la valeur de marché de l'actif correspond à la totalité du passif, c'est-à-dire à la somme des fonds propres et des provisions techniques (y compris marge de risque).

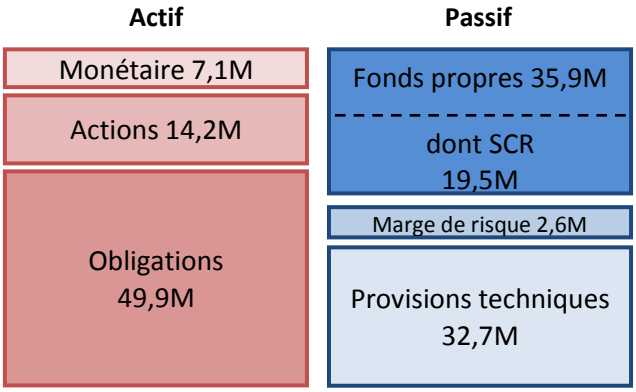


Figure 61 - Bilan S2 de l'assureur non-vie au début de la projection

Le montant des provisions techniques s'élève à 32,7M (8,2M€ pour la branche dommages automobile et 24,5M€ pour la branche RC automobile). Conformément à la méthode simplifiée utilisée, la marge de risque s'élève à 2,6M€ (8% de la provision technique nette de réassurance). Le SCR initial calculé est de 19,5M€. Le montant de fonds propres est de 35,9M€. Le taux de couverture du SCR par les fonds propres en début de projection de l'assureur non-vie est ainsi de 184%.

A l'actif, nous n'avons pas considéré d'ajustement pour défaut de contrepartie, en l'absence de réassurance dans notre exemple. L'actif de l'assureur s'élève à 71,2M€ (49,9M€ d'obligations, 14,2M€ d'actions et 7,1M€ de monétaire).

Nous avons projeté la situation de l'entreprise sans management action (appelé « scénario central »), puis avec application du management action sur la revalorisation tarifaire modélisée en logique classique (appelé « scénario logique classique ») et modélisée en logique floue (appelé « scénario logique floue »).

Chapitre 3 : La situation à l'horizon de projection dans le scénario central

La situation de l'entreprise est projetée sur 5 ans à partir de fin 2015, à l'aide d'un modèle stochastique et de 1000 simulations. L'horizon d'étude ainsi choisi correspond à la politique stratégique de l'assureur et est conforme à son exposition aux risques. Le fait de simuler 1000 fois la situation de l'assureur nous permet d'avoir une vision de la distribution des situations possibles de l'assureur (et non de seulement tester des scénarios stressés comme en déterministe).

Pour commencer, nous allons observer la situation de l'assureur sur l'horizon de projection dans le scénario central, sans management action.

En début de projection, la situation financière de l'assureur est correcte, sans toutefois être suffisamment confortable pour qu'il puisse se permettre une dérive de la sinistralité sur son portefeuille. Le montant des fonds propres couvre largement le montant de SCR (184%). Avec un ratio combiné global de 95,3%, l'assureur a un résultat technique en moyenne positif chaque année. Le résultat est toutefois disparate entre les deux branches. Alors que la branche dommages présente un ratio combiné confortable de 91,8%, la branche responsabilité civile est plus précaire avec son ratio de 99,0%. Les bénéfices obtenus sur cette dernière branche chaque année sont donc faibles.

L'impact de la simulation stochastique de la sinistralité peut être observé sur les différents taux de ratios combinés obtenus sur chaque simulation au fil du temps. Chaque simulation génère 5 taux (un pour chaque année de projection). Sur nos 1000 simulations, nous constatons donc les ratios combinés suivants (5000 ratios combinés par branche au total) :

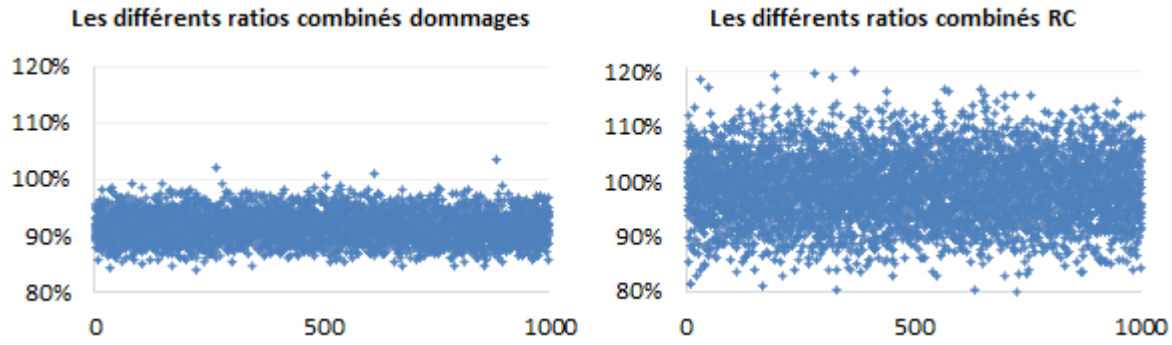


Figure 62 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par simulation

Le ratio combiné est constant dans le temps, la modélisation de la sinistralité étant indépendante entre les années de projection, et le scénario central ne prenant pas en compte le management action de revalorisation tarifaire. La branche dommages automobile est une branche bien moins volatile que la branche responsabilité civile automobile.

Pour chaque année de projection, nous obtenons la représentation suivante par branche :

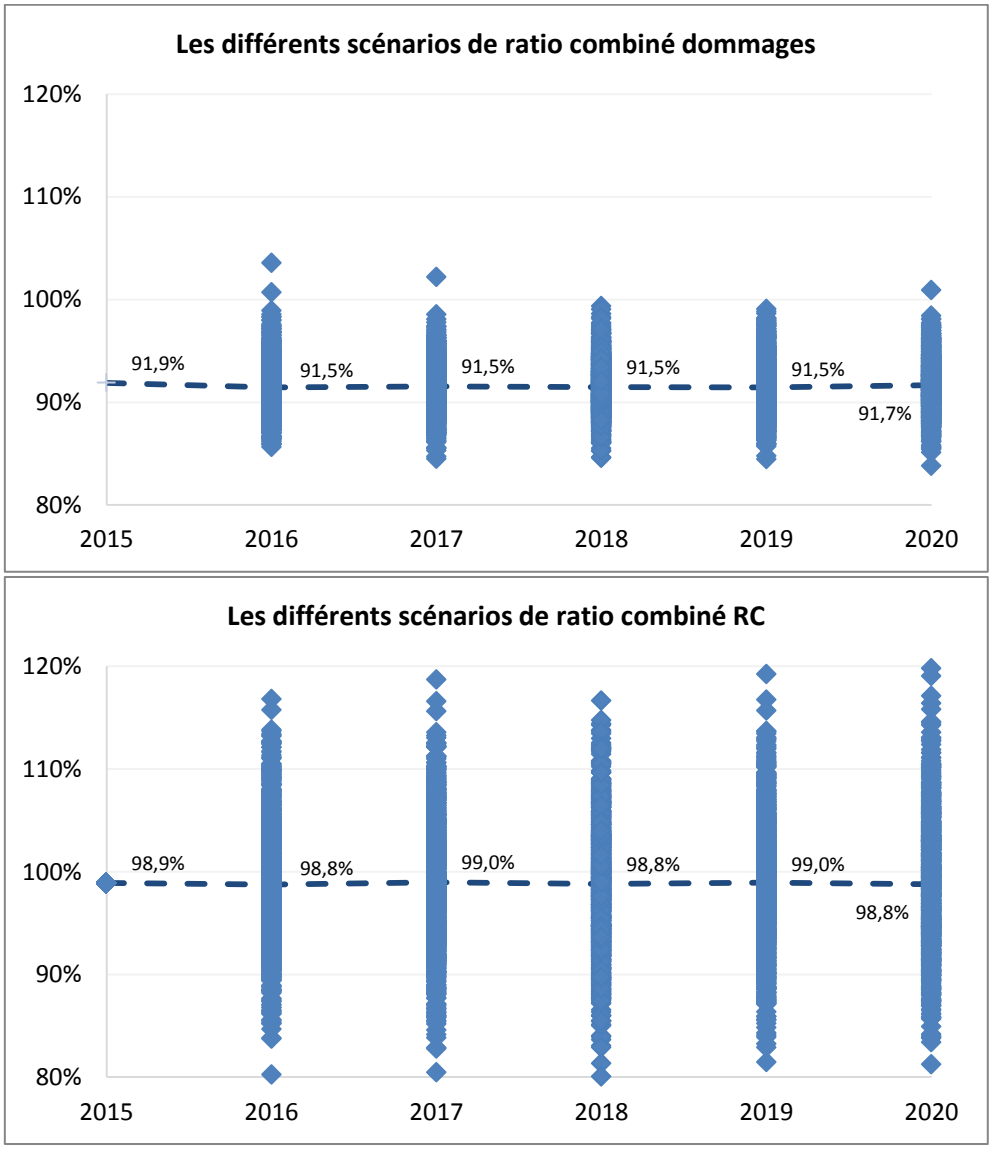


Figure 63 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par année de projection

Les variations autour de la valeur théorique (91,8% sur le dommage et 99% en responsabilité civile) s'expliquent par le nombre de simulations effectuées (1000) qui ne permet pas d'avoir une convergence vers la valeur moyenne parfaite.

1. L'évolution du résultat en scénario central

Le compte de résultat simplifié de l'assureur non-vie se décompose de la façon suivante :

+	Primes
-	Prestations
-	Frais administratifs
+	Produits financiers techniques
=	**Résultat technique non-vie**
+	Produits financiers non techniques
=	**Résultat**

Figure 64 - Compte de résultat simplifié de l'assureur non-vie

Nous considérons qu'il n'y a pas de résultat de gestion. Chaque année, le résultat de l'assureur non-vie est donc constitué des produits financiers réalisés sur les marchés financiers et du bénéfice qu'il réalise sur les primes perçues.

L'assureur reçoit chaque année des produits financiers. Ils proviennent des coupons perçus sur le portefeuille obligataire, des dividendes du portefeuille d'actions, ainsi que des plus-values réalisées sur l'année. Les produits financiers nets de frais de gestion des placements sont ensuite répartis entre les produits financiers techniques et non techniques. Les produits financiers techniques correspondent aux produits financiers générés par le placement des provisions techniques sur le marché financier. Avec le bénéfice réalisé sur les primes perçues, ils constituent le résultat technique de l'assureur. Les produits financiers non techniques correspondent aux produits financiers réalisés par les fonds propres.

Les produits financiers constituent une part importante du résultat de l'assureur. Sur tout l'horizon de projection, en moyenne, pour 100€ de résultat, 55€ proviennent des produits financiers. Sur les 45€ restants, 40€ proviennent de la marge technique de la branche dommages et 5€ de la marge technique de la branche responsabilité civile.

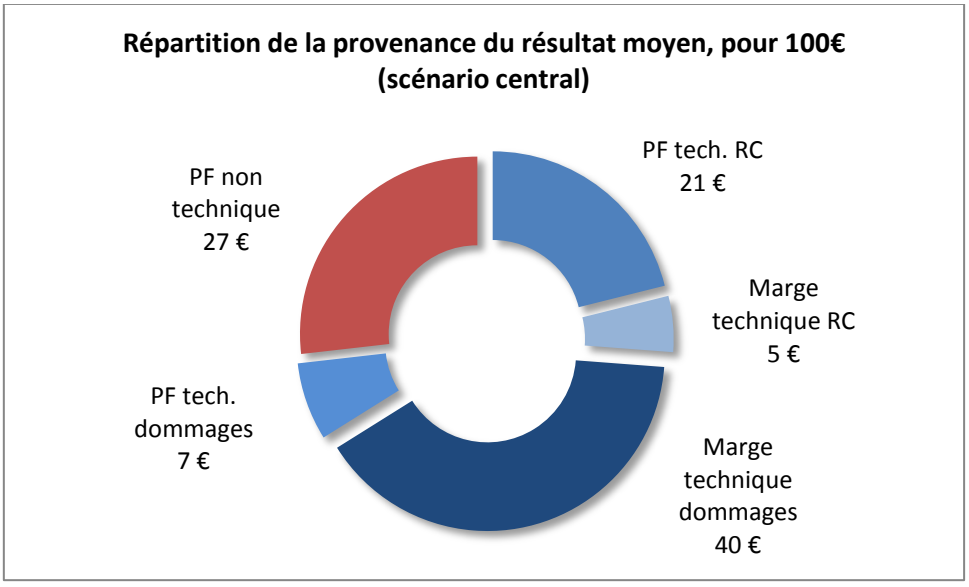


Figure 65 - Provenance en moyenne du résultat, pour 100€, dans le scénario central

Les produits financiers de la branche responsabilité civile sont importants et représentent 21€ pour 100€ de résultat. Ils proviennent du montant conséquent de provisions techniques sur cette branche qui est investi sur les marchés financiers. Le montant de produits financiers provenant des fonds propres s'élève à 27€ tandis que le montant de produits financiers sur la branche dommages est de 7€ du fait du faible montant des provisions techniques sur cette branche à règlement rapide.

Au fil de la projection, l'assureur voit son nombre de contrats grossir conformément à la croissance cible (3%). Son résultat moyen suit l'évolution du portefeuille.

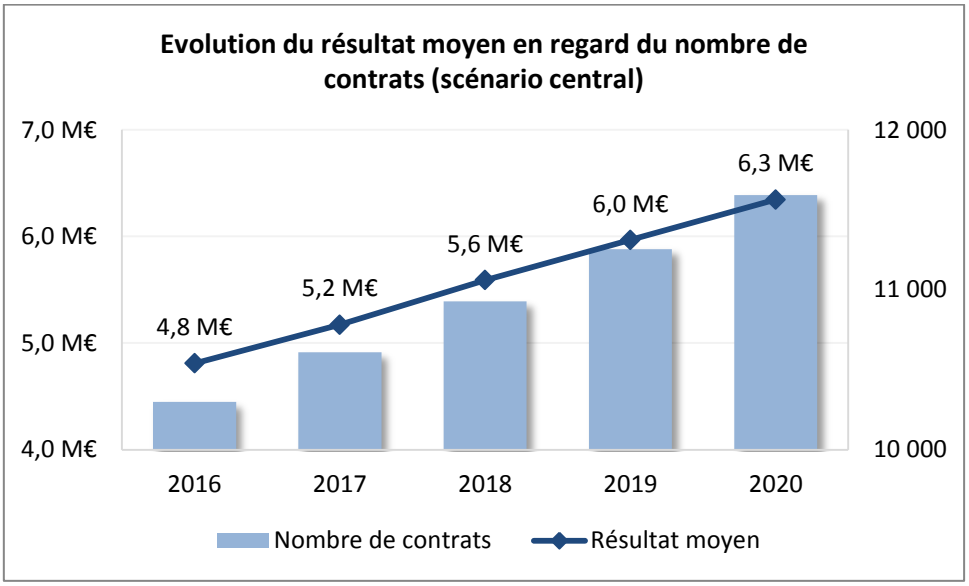


Figure 66 - Evolution du résultat moyen et du nombre de contrats, dans le scénario central

2. L'évolution de l'actif et du passif en scénario central

L'actif et le passif de l'assureur évoluent dans le temps en fonction des simulations. L'actif, en valeur de marché, évolue selon les performances des différentes classes d'actifs. Il est augmenté (ou diminué) chaque année en fonction du résultat réalisé par l'assureur. Le passif lui évolue en fonction de la sinistralité et des provisions techniques que l'assureur doit constituer.

Nous pouvons observer en moyenne l'évolution suivante de l'actif et du passif (hors fonds propres) :

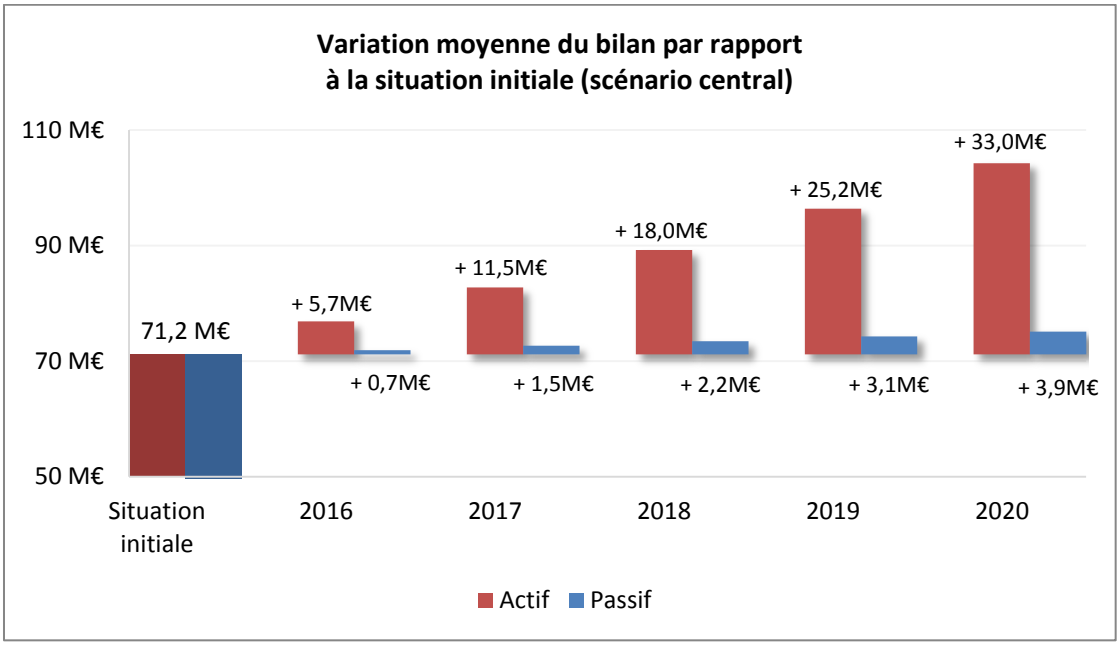


Figure 67 - Evolution moyenne du bilan de l'assureur chaque année, dans le scénario central

En moyenne, la sinistralité de l'assureur est constante dans le temps. Le passif de l'assureur augmente donc très peu chaque année, seulement en fonction de la croissance de la branche et du nombre de contrats. En moyenne, la performance de l'actif est positive. Le résultat dégagé par l'assureur chaque année est investi à l'actif. L'actif est arbitré de sorte à respecter l'allocation cible. Il augmente donc plus fortement chaque année, avec la progression de la valeur de marché et le réinvestissement des bénéfices.

Il convient de noter que nous observons ici le montant moyen de l'actif et du passif, sur nos 1000 simulations. Dans certaines simulations, l'actif de l'assureur est en moins-value et/ou son résultat est négatif. La valeur de l'actif diminue donc dans le temps dans certaines simulations et les fonds propres de l'assureur sont donc également réduits. C'est d'ailleurs l'objectif des fonds propres économiques que nous calculons par la suite : être en mesure de couvrir les pertes de l'assureur afin d'être solvable dans 99,5% des cas.

3. L'évolution du taux de couverture en scénario central

Les fonds propres économiques (le BOF) de l'assureur évoluent en fonction du delta entre l'actif et le passif. Tout au long de la projection, les fonds propres économiques progressent donc en moyenne. En conséquence, le taux de couverture moyen du SCR de l'assureur augmente chaque année.

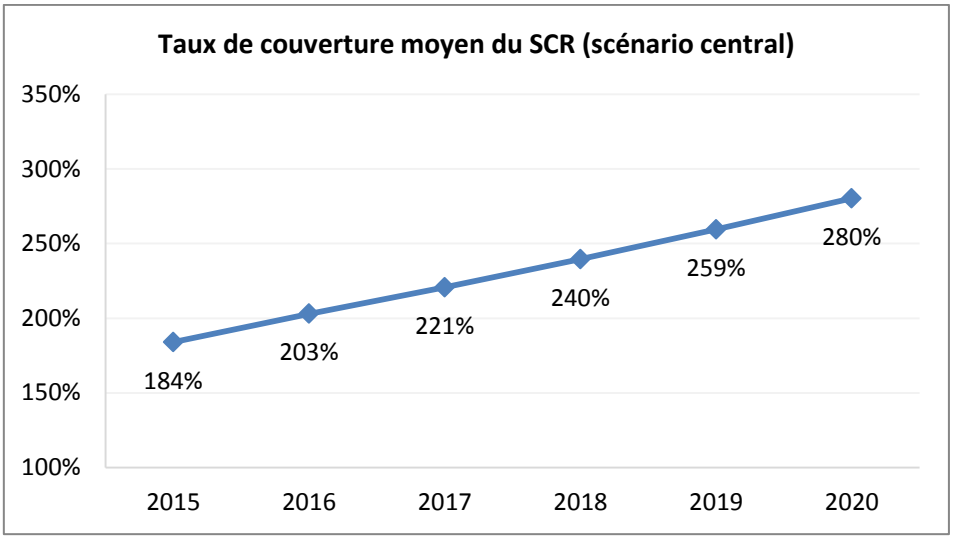


Figure 68 - Evolution du taux de couverture moyen du SCR, dans le scénario central

Le taux de couverture du SCR augmente en moyenne de 96 points de pourcentage entre 2015 et 2020. Il a une progression moyenne de 19 points chaque année. Il passe ainsi de 184% à 280% à la fin de la projection.

L'impact de la volatilité des simulations peut être observé sur le taux de couverture du SCR. Nous regardons l'évolution de ce taux dans le temps, à différents quantiles (à 5% et à 95%) par rapport au taux de couverture moyen.

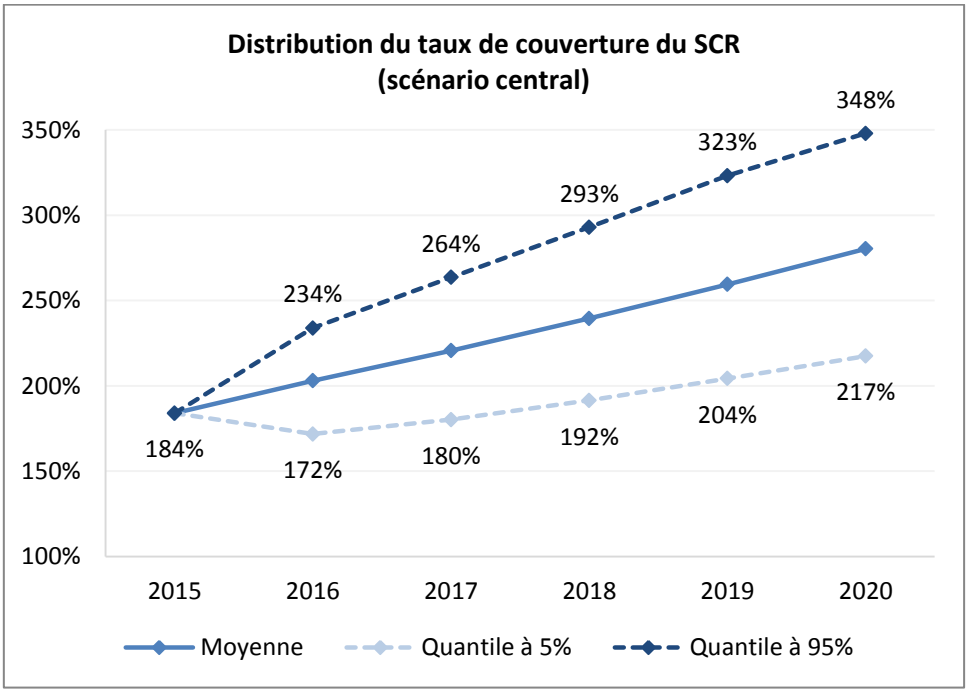


Figure 69 - Distribution du taux de couverture du SCR (scénario central)

Nous pouvons observer qu'au bout d'un an, l'assureur peut s'attendre à une distribution de son taux de couverture du SCR entre 172% et 234% dans 90% des cas. A l'horizon de projection (5 ans), son taux de couverture est compris entre 217% et 348% dans 90% des cas.

4. La détermination du besoin global de solvabilité en scénario central

Comme nous l'avons vu, l'actif de l'assureur change au gré de l'évolution des taux et de l'indice action. Le passif évolue lui au gré de la sinistralité modélisée. Même si le résultat est en moyenne positif de par le ratio combiné de l'assureur, il arrive dans certaines simulations que la sinistralité soit supérieure aux primes et/ou que l'assureur observe des moins-values à l'actif. Dans ces situations, le BOF peut se retrouver négatif et l'assureur être obligé de piocher dans ses fonds propres afin de couvrir ses pertes. Pour rappel, le BOF est déterminé par la différence entre l'actif de l'assureur en valeur de marché et la valeur économique du passif.

Dans notre exercice ORSA en exemple dans ce mémoire, le besoin global de solvabilité est calculé à partir de la distribution du delta BOF (la variation de BOF entre deux exercices) et correspond à la VaR à 99,5% de cette distribution.

Sur l'horizon de projection, nous observons la distribution suivante du delta BOF et le quantile à 99,5% :

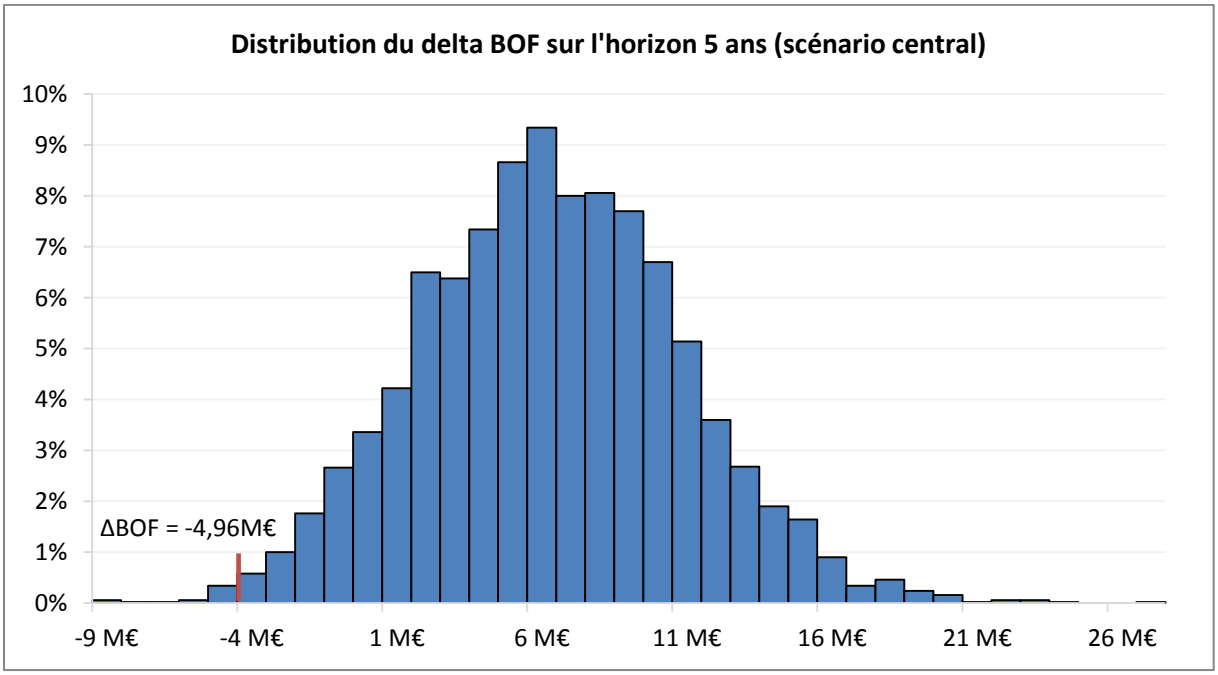


Figure 70 - Distribution du delta BOF sur l'horizon 5 ans, dans le scénario central

Le besoin global de solvabilité est donc de 4,96M€ dans notre scénario central, sans management action.

Chapitre 4 : Les bénéfices du management action de revalorisation tarifaire

Le scénario central ne tient pas compte des actions que l'entreprise d'assurance pourrait entreprendre afin d'améliorer sa situation dans un contexte particulier. Dans notre exemple, nous avons développé le management action de revalorisation tarifaire. En fonction du ratio combiné et du taux de couverture du SCR, nous avons simulé la décision du top management de revaloriser les tarifs du contrat.

Comme nous l'avons vu précédemment, la prise en compte dans le modèle de projection des flux de cette capacité d'action de l'assureur est indispensable dans le cadre d'un exercice ORSA. Cela permet d'avoir des résultats pertinents et réalistes et doit conduire à un besoin de capital cohérent avec les leviers d'actions dont dispose l'entreprise.

Nous pouvons illustrer l'apport de ce management action de revalorisation tarifaire en se basant sur les résultats obtenus en logique classique. Les résultats obtenus en logique floue seront présentés dans le chapitre suivant pour illustrer l'apport de cette logique par rapport à la logique classique.

1. L'évolution du ratio combiné et du résultat moyen en scénario classique

Le management action permet à l'entreprise d'augmenter son tarif lorsque son taux de couverture est jugé insuffisant ou lorsque son ratio combiné se dégrade. En contrepartie, le nombre d'affaires nouvelles est impacté selon la revalorisation tarifaire calculée. Dans le cas où la situation de l'assureur est confortable, il peut même diminuer son tarif afin d'attirer plus de nouveaux clients et augmenter sa marge.

La revalorisation diffère selon la branche (dommages ou RC) et en fonction du ratio combiné simulé. La revalorisation tarifaire moyenne constatée sur chacune de nos branches est la suivante :

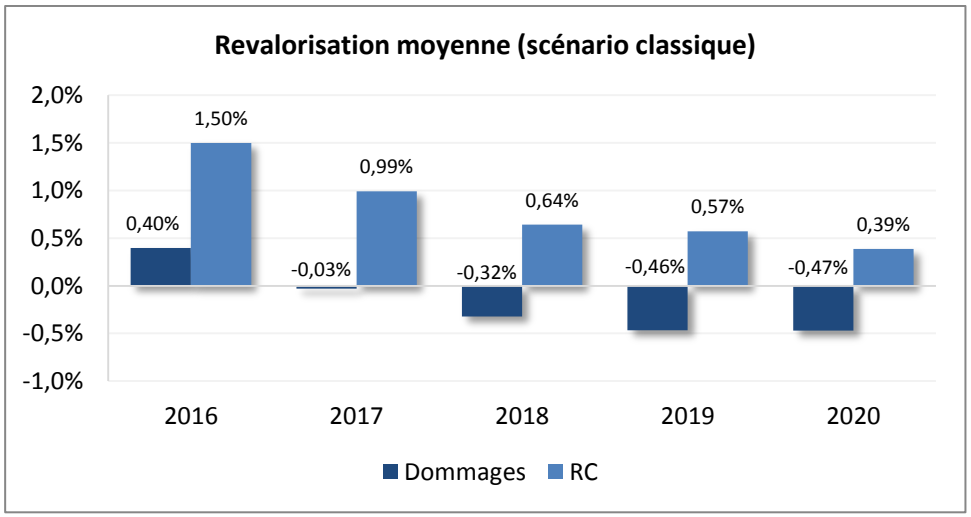


Figure 71 -Revalorisation tarifaire moyenne par branche, dans le scénario classique

La revalorisation tarifaire moyenne est bien entendu plus importante sur la branche responsabilité civile, étant donné le ratio combiné moyen plus élevé. Les résultats dégagés par l'assureur les premières années lui permettent d'améliorer en moyenne son taux de couverture du SCR. L'assureur n'a donc pas besoin d'augmenter trop fortement son tarif en moyenne et il peut même le diminuer sur la branche dommages : il augmente ainsi le nombre d'affaires nouvelles et son résultat.

1.1. Impact du management action classique sur le ratio combiné

La revalorisation tarifaire effectuée chaque année par l'assureur a un impact sur le ratio combiné des années suivantes. En augmentant son tarif une année, le ratio combiné moyen observé les années suivantes sera inférieur à celui observé en scénario central. Nous observons l'évolution du ratio combiné de nos deux branches en scénario classique sur les graphiques suivants :

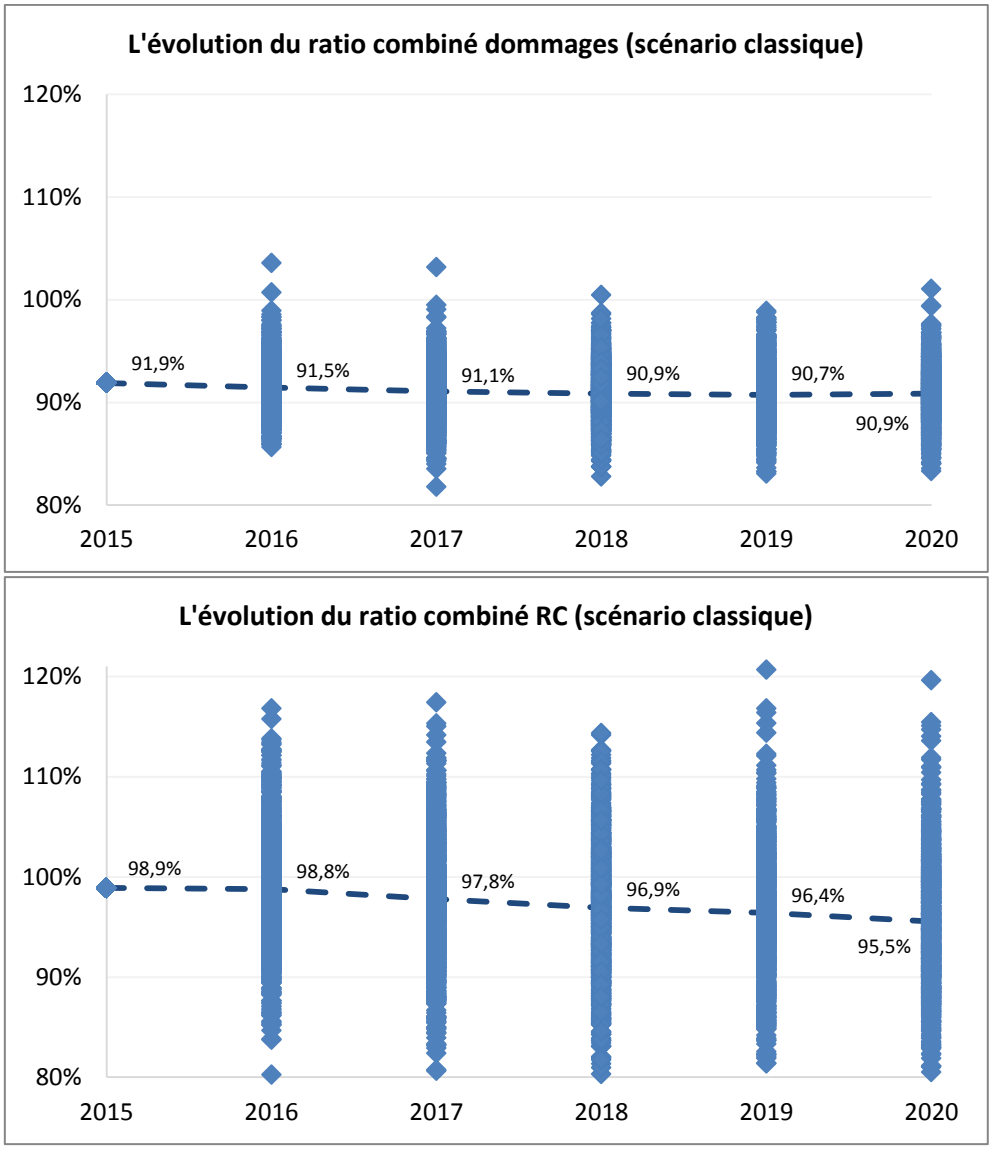


Figure 72 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par année de projection (scénario classique)

Ces revalorisations tarifaires successives permettent d'améliorer le ratio combiné sur les deux branches, mais n'ont pas d'impact significatif sur la volatilité des simulations.

Sur la branche dommages, le ratio combiné diminue au départ grâce à l'augmentation tarifaire puis augmente légèrement du fait de la fidélisation. La revalorisation tarifaire engendre donc une baisse de 1 point de pourcentage sur le ratio combiné moyen de cette branche. Sur la branche responsabilité civile, le ratio combiné moyen décroît au fil des années. La revalorisation tarifaire génère en moyenne une diminution de 3,4 points de pourcentage du ratio combiné.

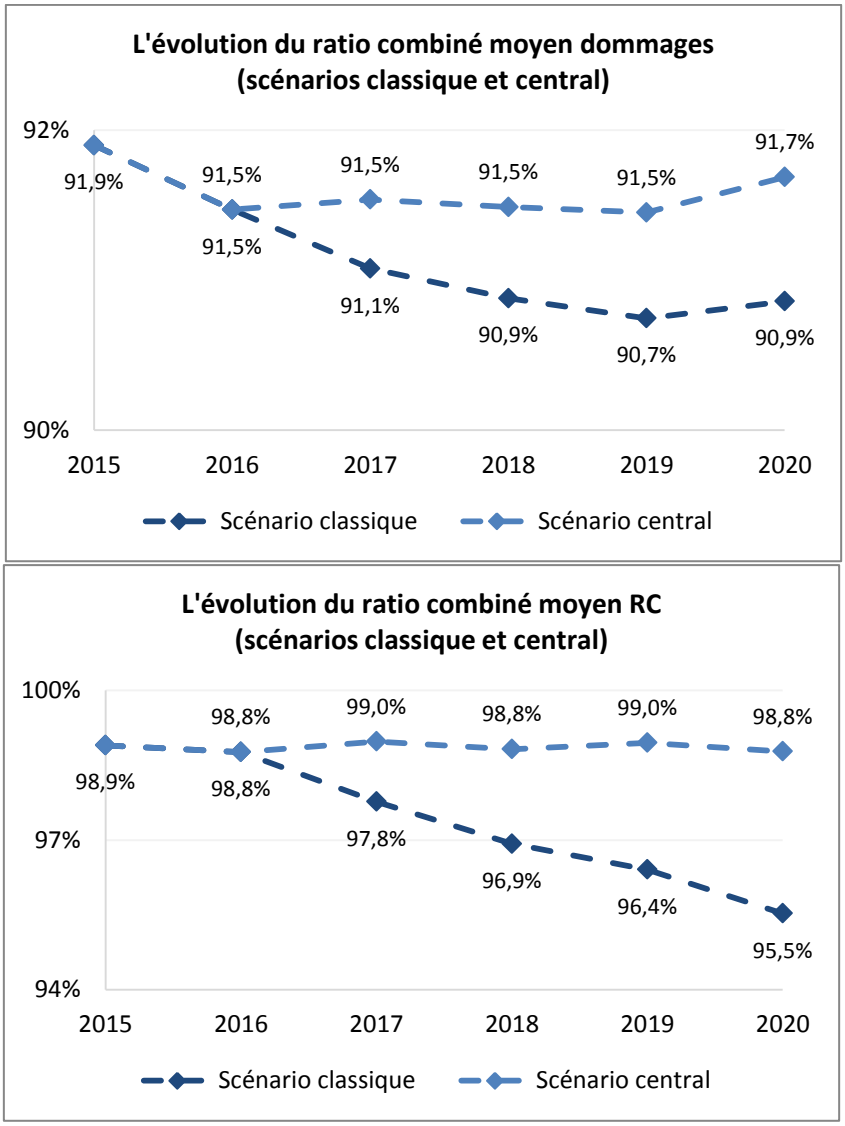


Figure 73 - Comparaison de l'évolution du ratio combiné moyen entre les scénarios classique et central

Par exemple, sur la branche responsabilité civile, au bout de 5 ans, le ratio combiné moyen est de 98,8% en scénario central et de 95,5% en scénario classique. La revalorisation tarifaire engendre donc une baisse de 3,3 points de pourcentage sur le ratio combiné moyen de cette branche.

1.2. Impact du management action classique sur le résultat moyen

En moyenne, dans le scénario classique, le résultat est donc meilleur grâce à la revalorisation tarifaire, avec un nombre de contrats sensiblement supérieur au scénario central (11,7K au bout de 5 ans dans le scénario classique contre 11,6K dans le scénario central).

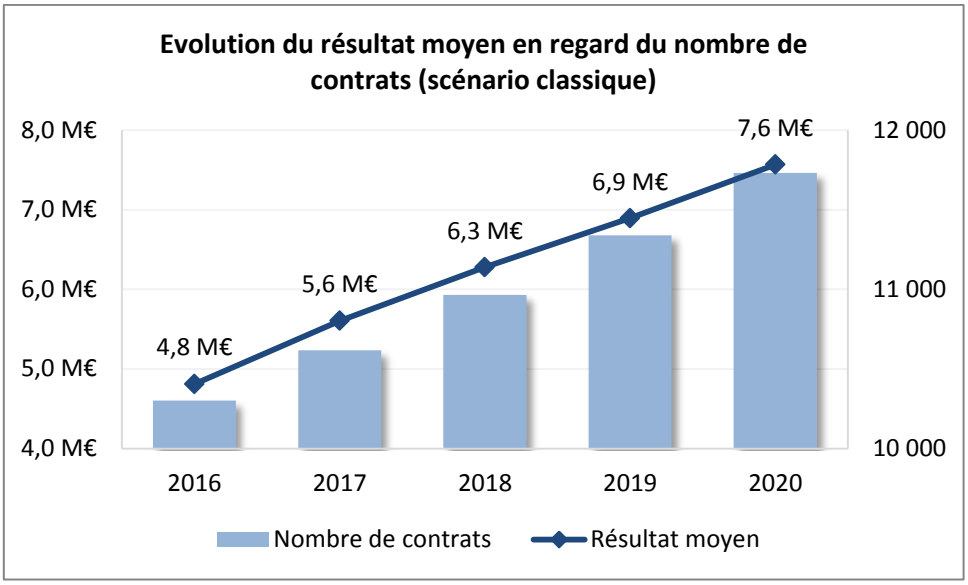


Figure 74 - Evolution du résultat moyen et du nombre de contrats, dans le scénario classique

Après la première année, les hausses tarifaires génèrent une augmentation du résultat moyen de 8,3% (5,60M en scénario classique contre 5,17M€ en scénario central).

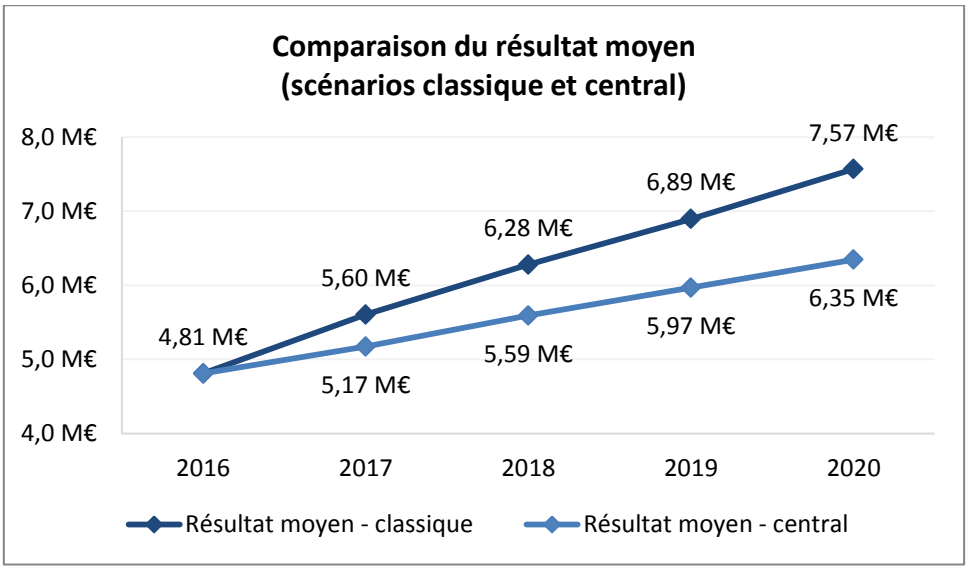


Figure 75 - Comparaison du résultat moyen entre le scénario classique et le scénario central

Au bout de 5 ans, l'écart constaté sur le résultat moyen est de 1,22M€ entre le scénario classique et le scénario central soit une augmentation de 19% (7,57M€ contre 6,35M€).

2. L'évolution du taux de couverture en scénario classique

L'assureur dégage donc un meilleur résultat en moyenne chaque année. En toute logique, le taux de couverture moyen du SCR est également meilleur. Par rapport au scénario central, l'assureur gagne en moyenne 9 points de pourcentage avec le management action au bout de 5 ans (289% en scénario classique contre 280% en scénario central).

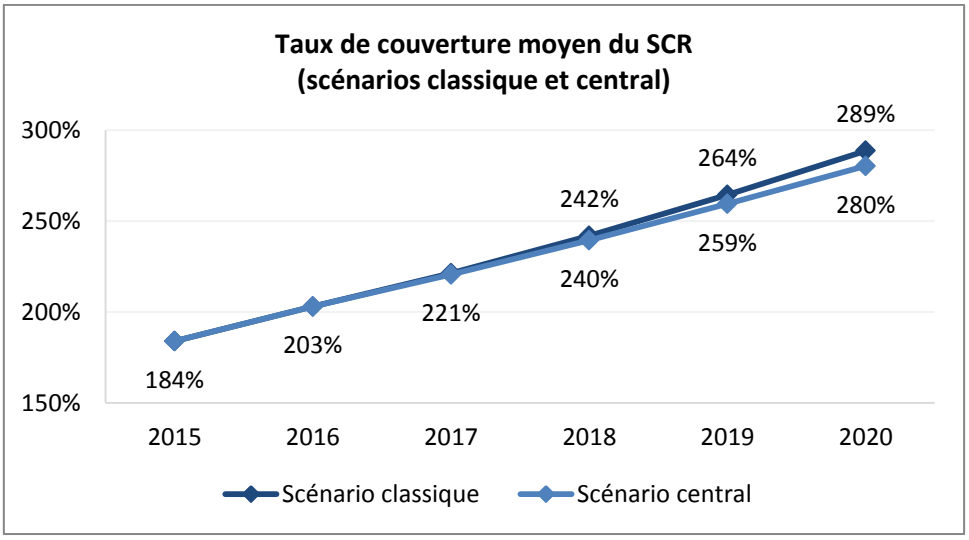


Figure 76 - Evolution du taux de couverture moyen du SCR, dans les scénarios classique et central

La volatilité des simulations est moindre grâce à l'apport du management action. La revalorisation tarifaire permet de limiter les simulations extrêmes tout en augmentant le résultat moyen.

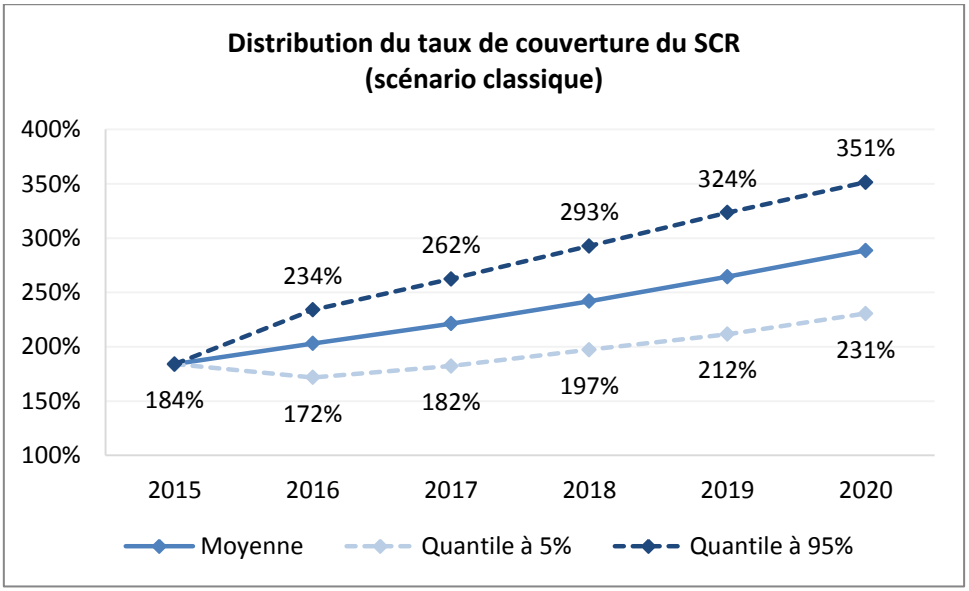


Figure 77 - Distribution du taux de couverture du SCR (scénario classique)

Nous pouvons observer qu'au bout d'un an, l'assureur peut s'attendre à une distribution de son taux de couverture du SCR entre 172% et 234% dans 90% des cas (identique au scénario central). Mais à l'horizon de projection (5 ans), son taux de couverture est compris entre 231% et 351% dans 90% des cas (contre 217% et 348% dans le scénario central).

L'implémentation du management action de revalorisation tarifaire a donc un impact certain sur les pertes extrêmes auxquelles l'assureur doit faire face. La revalorisation tarifaire lui permet de corriger sa situation dans le cas où cette dernière est dégradée. Nous l'observons notamment sur la distribution du quantile à 5% du taux de couverture du SCR.

Dans le scénario classique, le quantile à 5% est augmenté jusqu'à 14 points de pourcentage à l'horizon de projection.

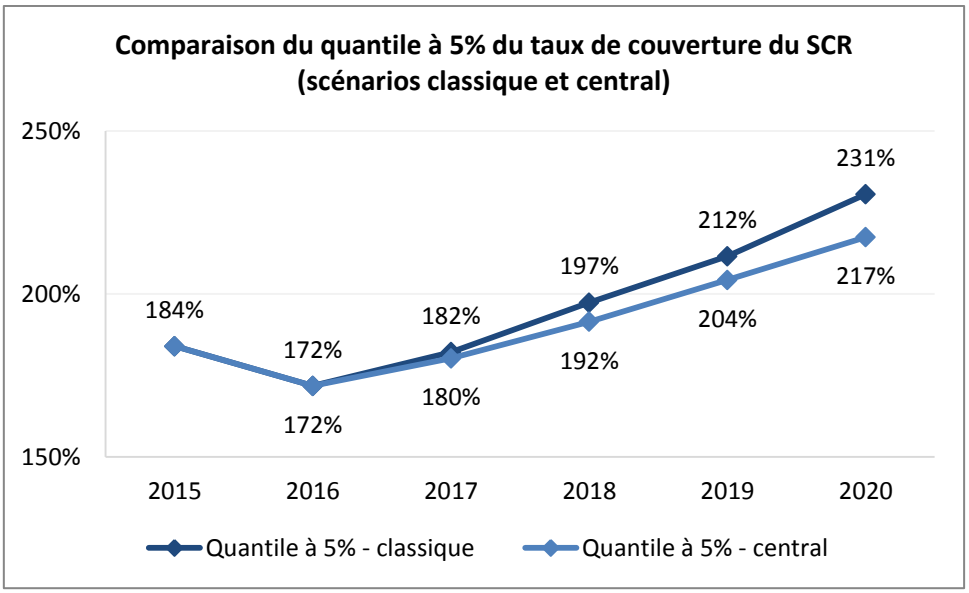


Figure 78 - Comparaison du quantile à 5% du taux de couverture du SCR, entre le scénario classique et le scénario central

3. La détermination du besoin global de solvabilité en scénario classique

Cette capacité à améliorer la situation de l'assureur dans les scénarios extrêmes en intervenant sur la tarification se reflète tout naturellement sur le besoin global de solvabilité. Sur l'horizon de projection, nous observons la distribution suivante du delta BOF et le quantile à 99,5% :

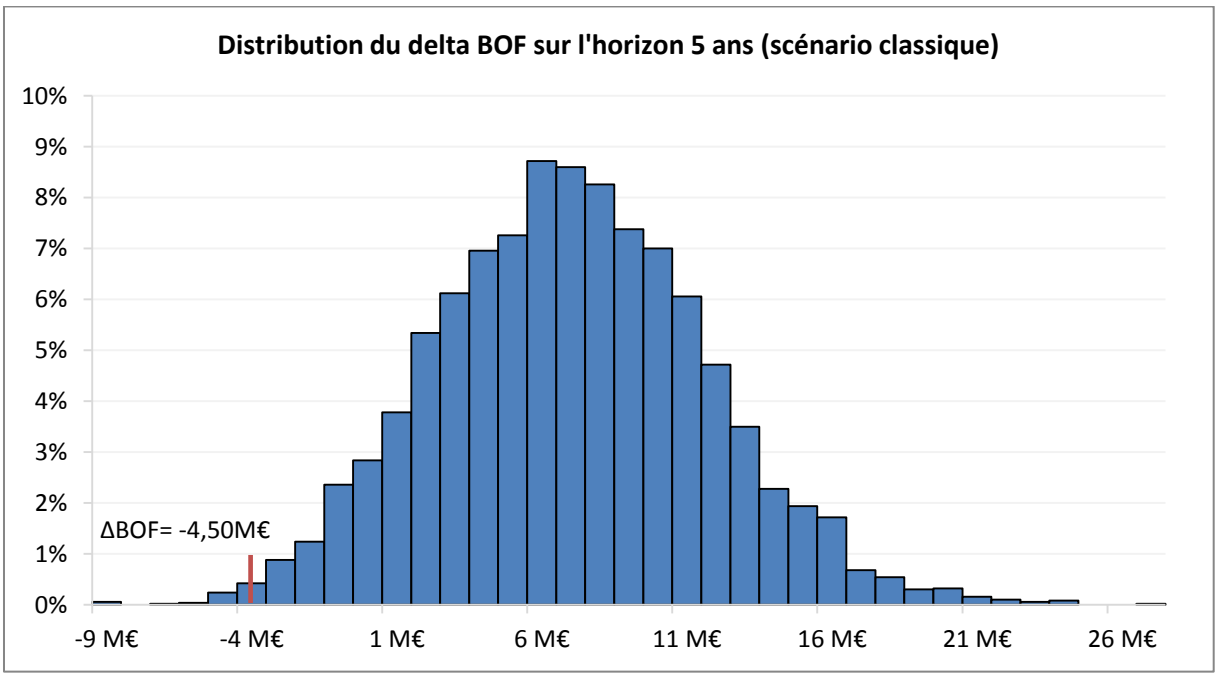


Figure 79 - Distribution du delta BOF sur l'horizon 5 ans, dans le scénario classique

Le besoin global de solvabilité est donc de 4,50M€ dans notre scénario classique, avec le management action développé en logique classique. Le gain est de 9,3% par rapport au scénario central, sans management action.

	Besoin global de solvabilité	Gain apporté
Scénario central	4,96M€	-
Scénario classique	4,50M€	**460K€**

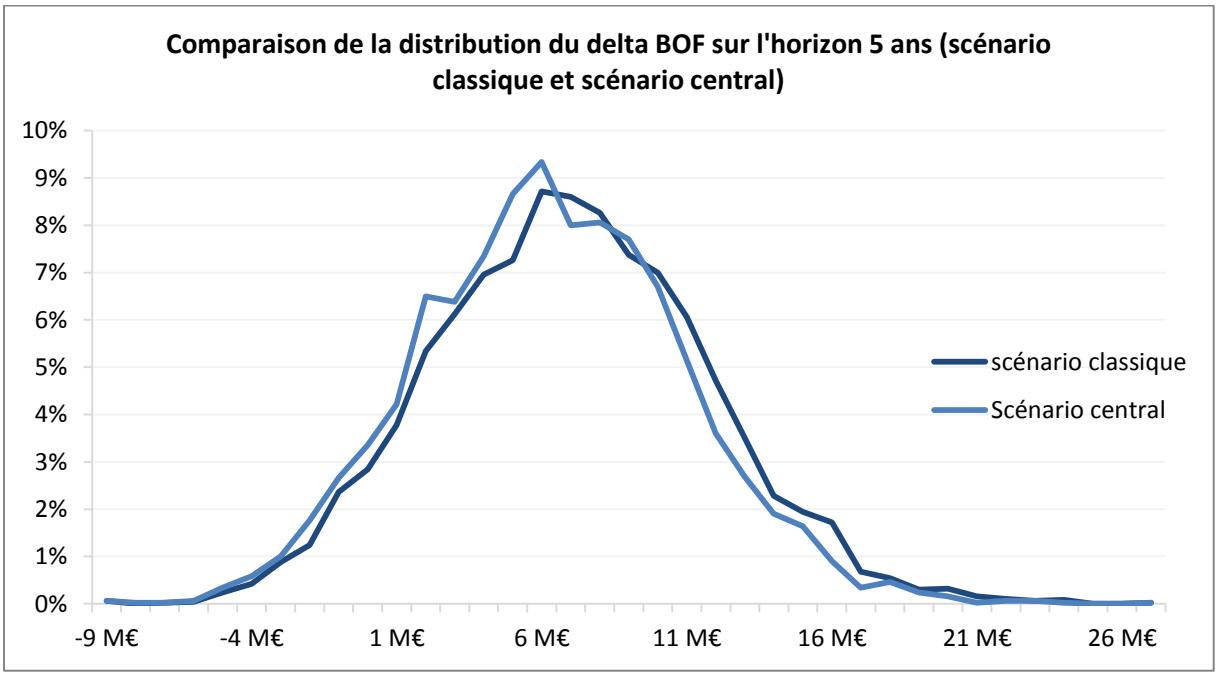


Figure 80 - Comparaison de la distribution du delta BOF entre le scénario classique et le scénario central

La comparaison de la distribution du delta BOF entre le scénario central et le scénario classique illustre tout l'apport du management action évoqué précédemment : le résultat moyen s'améliore sensiblement et les pertes sont moins fréquentes grâce au management action puisque nous observons une translation de la distribution du delta BOF vers la droite.

Pour résumer, l'ajout du management action en logique classique permet une revalorisation tarifaire qui impacte positivement le nombre de contrats en portefeuille, le ratio combiné et le résultat moyen. Le meilleur résultat entraîne des fonds propres plus élevés et donc un taux de couverture amélioré. Ces bénéfices apportés grâce à la revalorisation tarifaire permettent donc à l'assureur de diminuer son besoin global de solvabilité.

Nous allons maintenant nous intéresser à ce qu'apporte la logique floue par rapport à ce management action classique.

Chapitre 5 : Les bénéfices de la modélisation du management action en logique floue

Le scénario classique tient compte des actions de revalorisation tarifaire que l'entreprise d'assurance pourrait entreprendre afin d'améliorer sa situation dans un contexte particulier. Ce management action a été développé en logique binaire.

Comme nous l'avons vu précédemment, la logique binaire présente des limites. L'ensemble des décisions générées est nécessairement linéaire et présente des sauts entre chaque classe. En logique classique, la revalorisation tarifaire est de -1%, 1%, 3,25% ou 6,25%. Il n'existe pas de revalorisation intermédiaire et le modèle applique seulement une de ces quatre revalorisations.

La modélisation du management action de revalorisation tarifaire en logique floue permet de répondre à ces problématiques. L'ensemble des décisions généré est non-linéaire et sans discontinuité.

Nous pouvons illustrer l'apport de la logique floue en se basant sur les résultats obtenus avec le management action développé en logique floue. Ces résultats sont comparés à ceux obtenus en logique classique qui ont été présentés dans le chapitre précédent.

Avant de rentrer dans l'analyse chiffrée de l'impact de la logique floue, il convient d'observer que la logique floue ne conduit pas nécessairement à un résultat meilleur (ou moins bon d'ailleurs). L'apport de la logique floue sur les résultats dépend des modèles et des situations rencontrées par l'entreprise. L'illustration de l'apport de la logique floue dans cet exemple n'est applicable qu'à notre modèle, et ne permet pas de tirer des conclusions quantitatives applicables à tous les modèles.

1. L'évolution du ratio combiné et du résultat moyen en scénario flou

Dans le cas de notre modèle, la modélisation du management action à l'aide de la logique floue entraîne une revalorisation moyenne plus importante qu'en logique classique.

La revalorisation moyenne constatée à la fin de chaque année est récapitulée dans le tableau ci-dessous :

Dommages	2016	2017	2018	2019	2020	**Moyenne**
Scénario flou	0,59%	0,11%	-0,17%	-0,31%	-0,33%	**-0,02%**
Scénario classique	0,40%	-0,03%	-0,32%	-0,46%	-0,47%	**-0,18%**
RC	2016	2017	2018	2019	2020	**Moyenne**
Scénario flou	1,73%	1,17%	0,77%	0,64%	0,46%	**0,96%**
Scénario classique	1,50%	0,99%	0,64%	0,57%	0,39%	**0,82%**

Toutes années de projection confondues, nous observons une revalorisation moyenne supérieure d'à peu près 16 points en logique floue sur la branche dommages (-0,02% en logique floue, contre -

0,18% en logique classique). Sur la branche responsabilité civile, la revalorisation moyenne est supérieure d'à peu près 14 points en logique floue (0,96% en logique floue, contre 0,82% en logique classique).

Graphiquement, nous avons la représentation suivante :

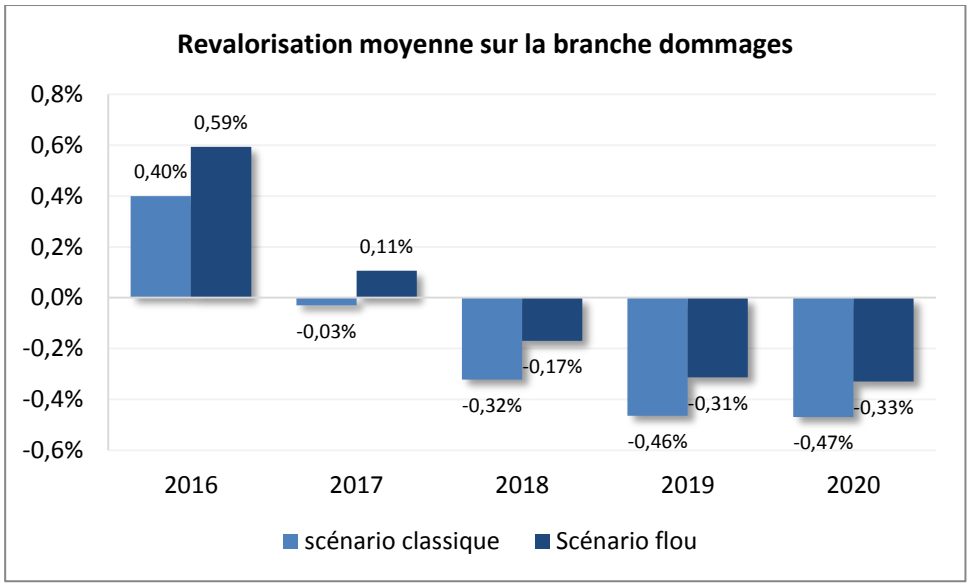


Figure 81 - Comparaison de la revalorisation tarifaire moyenne en dommages, entre le scénario classique et le scénario flou

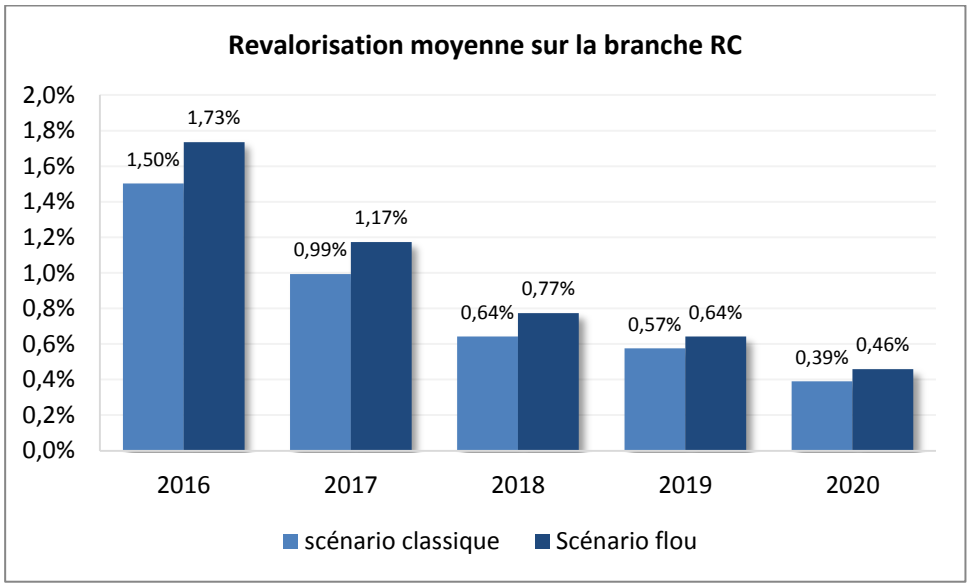


Figure 82 - Comparaison de la revalorisation tarifaire moyenne en RC, entre le scénario classique et le scénario flou

Le faible écart moyen par année entre les deux scénarios vient conforter l'acceptabilité du paramétrage de la revalorisation en logique classique à partir du paramétrage réalisé pour la logique floue. Les décisions de management prises sont cohérentes entre les deux scénarios et affichent donc en moyenne une revalorisation proche.

1.1. Impact du management action flou sur le ratio combiné

La revalorisation tarifaire étant en moyenne plus élevée dans le scénario flou, le ratio combiné moyen est plus fortement impacté en logique floue qu'en logique classique.

Nous observons l'évolution du ratio combiné de nos deux branches en scénario flou sur les graphiques suivants :

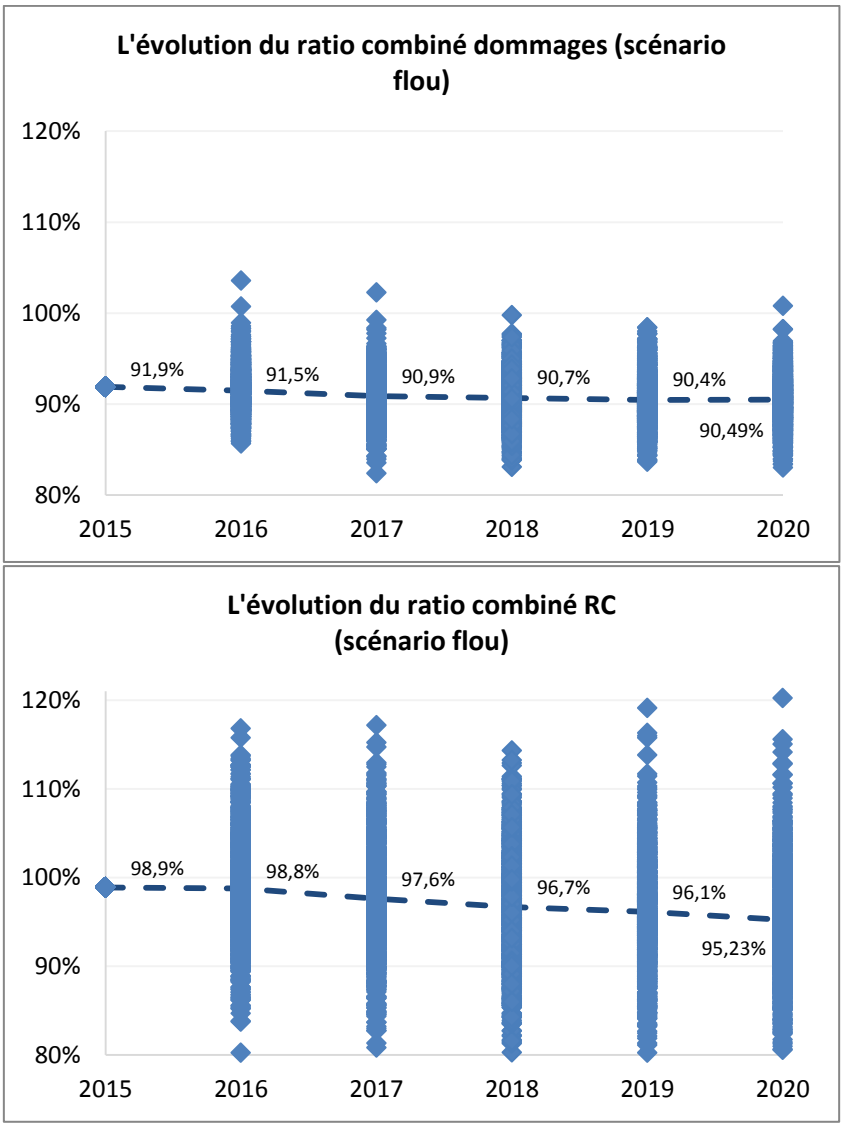


Figure 83 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par année de projection (scénario flou)

Le ratio combiné moyen sur les deux branches décroît plus fortement au fil des années en logique floue qu'en logique classique. Le management action de revalorisation tarifaire développé en logique floue n'a pas d'impact sur la volatilité des simulations. La dispersion observée en logique floue est semblable à celle observée en logique classique.

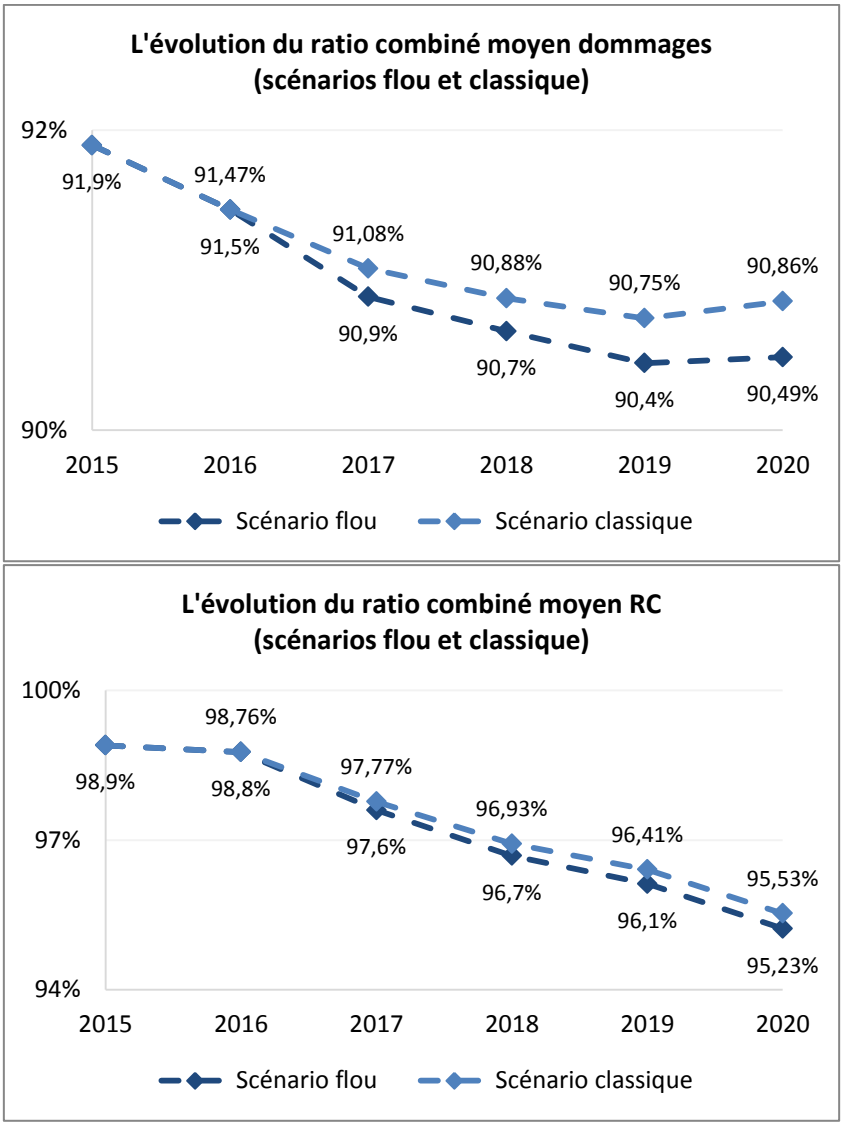


Figure 84 - Comparaison de l'évolution du ratio combiné moyen entre les scénarios flou et classique

Sur la branche dommages, le ratio combiné moyen au bout de 5 ans est par exemple de 90,49% en scénario flou contre 90,86% en scénario classique. L'utilisation de la logique floue a donc un impact de 37 points de base sur le ratio combiné moyen à 5 ans sur la branche dommages. Sur la branche responsabilité civile, le ratio combiné moyen au bout de 5 ans est de 95,23% en scénario flou contre 95,53% en scénario classique. Sur cette branche, l'impact de la logique floue sur le ratio combiné moyen à 5 ans est donc de 30 points de base.

1.2. Impact du management action flou sur le résultat moyen

En moyenne, le résultat est meilleur dans le scénario flou que dans le scénario classique, de par la revalorisation tarifaire en moyenne plus importante. Cette revalorisation plus élevée a néanmoins un impact sur le nombre de contrats : le nombre de contrats moyen est légèrement plus faible en logique floue qu'en logique classique (11,69K au bout de 5 ans dans le scénario flou contre 11,72K dans le scénario classique).

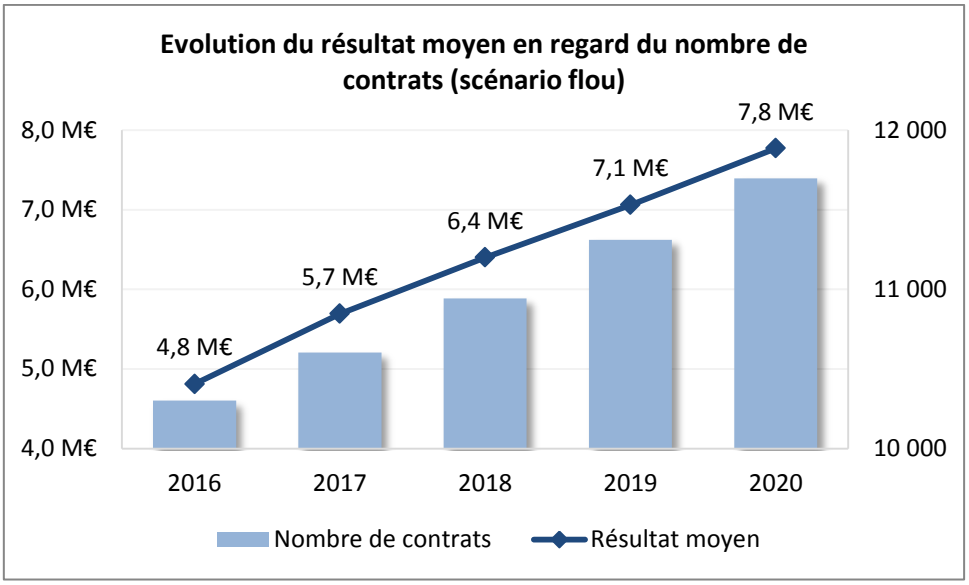


Figure 85 - Evolution du résultat moyen et du nombre de contrats, dans le scénario flou

Après la première année, l'utilisation de la logique floue permet d'augmenter le résultat moyen de 1,6% par rapport à l'utilisation de la logique classique (5,69M en scénario flou contre 5,60M€ en scénario classique).

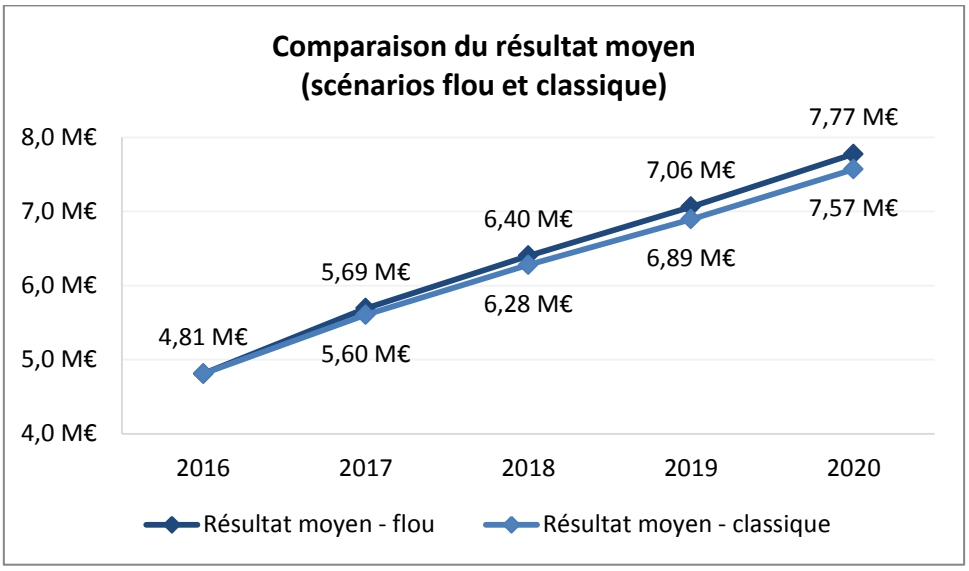


Figure 86 - Comparaison du résultat moyen entre le scénario flou et le scénario classique

Au bout de 5 ans, l'écart constaté sur le résultat moyen est de 200K€ entre le scénario flou et le scénario classique (7,77M€ contre 7,58M€).

Résultat moyen	2016	2017	2018	2019	2020	Cumulé
Scénario flou	4,81	5,69	6,40	7,06	7,77	31,73
Scénario classique	4,81	5,60	6,28	6,89	7,57	31,15
Différence	**0,00**	**0,09**	**0,12**	**0,17**	**0,20**	**0,58**

Sur tout l'horizon de projection, l'utilisation de la logique floue dans le modèle permet de dégager en moyenne 580K€ de résultat en plus.

2. L'évolution du taux de couverture en scénario flou

L'utilisation de la logique floue améliore le résultat de l'assureur dans notre modélisation. Le taux de couverture moyen du SCR est donc meilleur avec la logique floue.

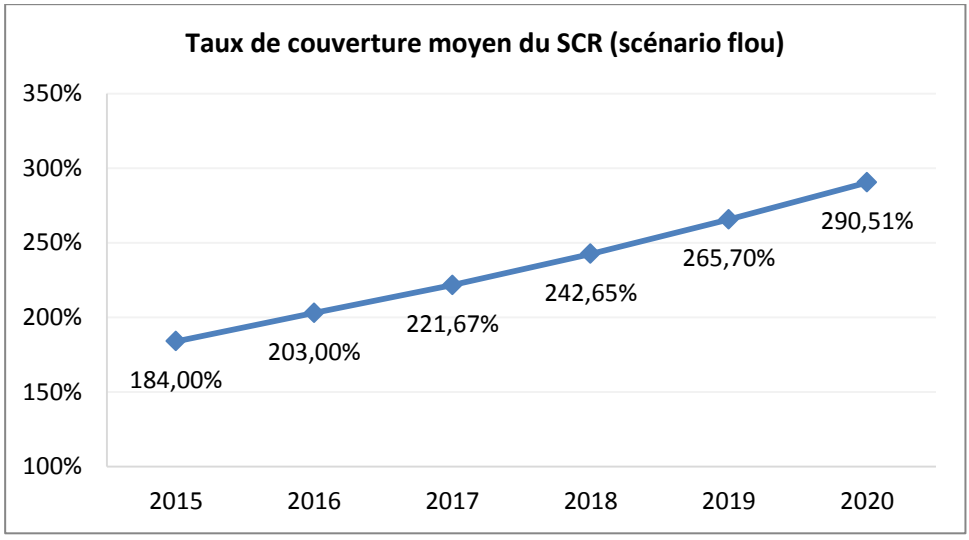


Figure 87 - Evolution du taux de couverture moyen du SCR, dans le scénario flou

Par rapport au scénario classique, l'assureur gagne en moyenne 187 points de base avec la logique floue au bout de 5 ans (290,5% en scénario flou contre 288,6% en scénario classique).

Taux de couverture	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Scénario flou	184%	203%	221,67%	242,65%	265,70%	290,51%
Scénario classique	184%	203%	221,34%	241,91%	264,45%	288,64%
Différence (pb)	**-**	**-**	**33**	**74**	**125**	**187**

La logique floue n'a pas un grand impact sur la volatilité des simulations par rapport à la logique classique. La dispersion observée sur le taux de couverture du SCR est à peu près équivalente. La logique floue augmente toutefois sensiblement le résultat moyen (jusqu'à 187 points de base au bout de 5 ans comme nous venons de le voir) et les valeurs aux quantiles sont donc sensiblement meilleures.

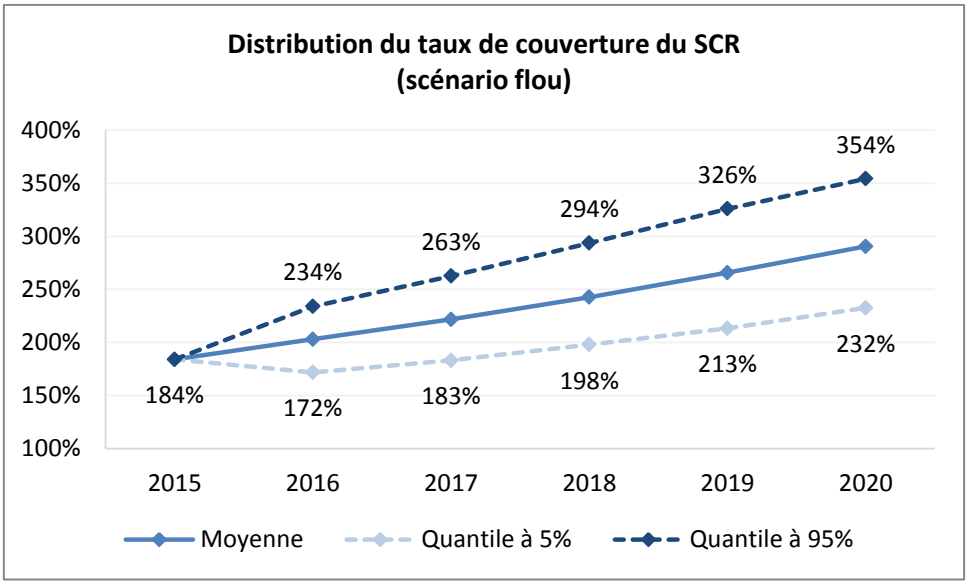


Figure 88 - Distribution du taux de couverture du SCR (scénario flou)

La différence n'est pas très importante par rapport au scénario classique. A l'horizon de projection (5 ans), l'assureur peut s'attendre à une distribution de son taux de couverture du SCR entre 232% et 354% dans 90% des cas (contre 231% et 351% dans le scénario classique).

Le gain sur le taux de couverture moyen en utilisant la logique floue pour modéliser le management action de revalorisation tarifaire est relativement faible. Cela s'explique par les montants importants en jeu : au bout de 5 ans, les fonds propres moyens sont de près de 68M€ (pour des fonds propres de 35,9M€ à l'origine). L'impact du gain généré sur les résultats grâce à la logique floue (de l'ordre de 580K€ en cumulé) est donc faible.

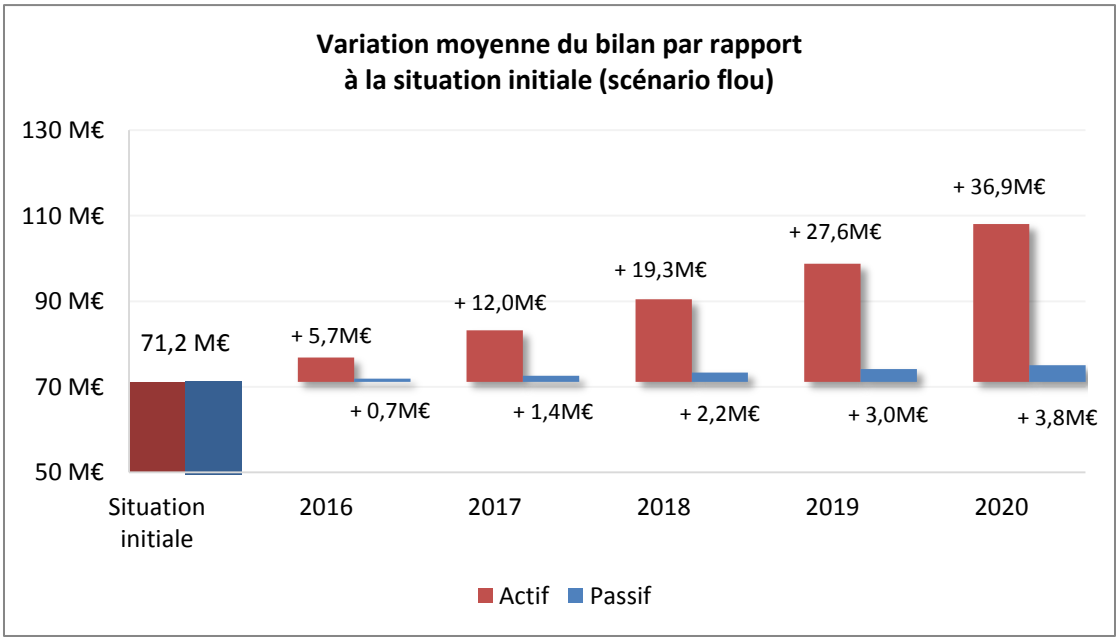


Figure 89 - Evolution moyenne du bilan de l'assureur chaque année, dans le scénario flou

3. La détermination du besoin global de solvabilité en scénario flou

Nous avons ainsi observé l'impact de la logique floue sur notre résultat moyen. La modélisation du management action de revalorisation tarifaire à l'aide de la logique floue a également un impact sur notre quantile à 99,5% du delta BOF. La logique floue limite le besoin de capital des simulations extrêmes, avec une revalorisation plus importante en général. Sur l'horizon de projection, nous observons la distribution suivante du delta BOF et le quantile à 99,5% :

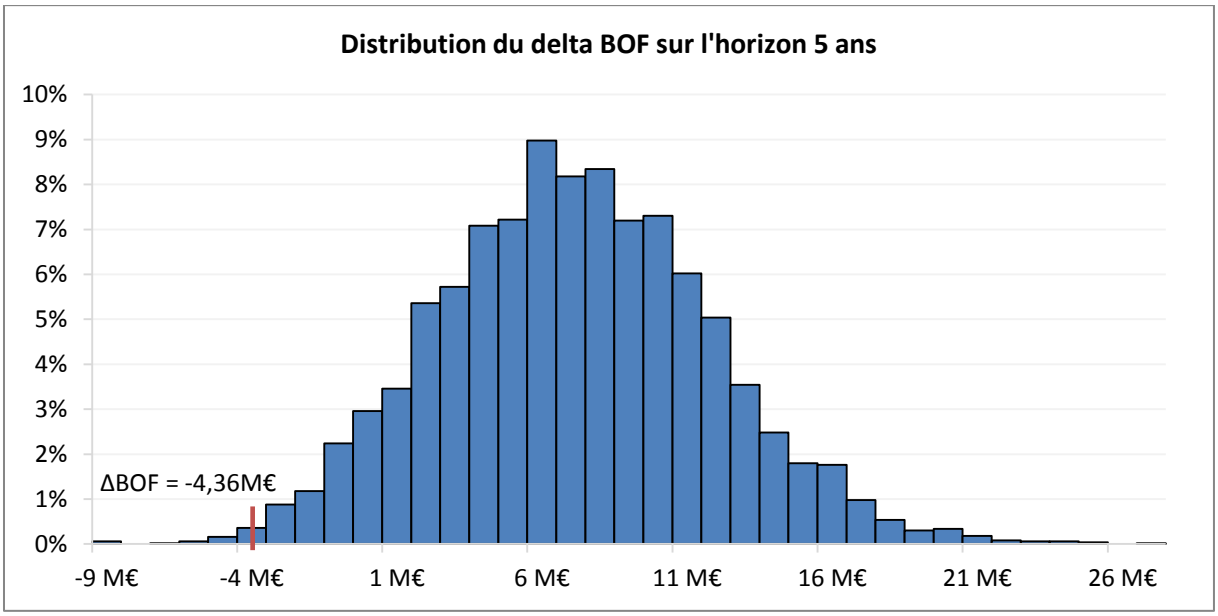


Figure 90 - Distribution du delta BOF sur l'horizon 5 ans, dans le scénario flou

Le besoin global de solvabilité est donc de 4,36M€ dans notre scénario flou. Pour rappel, le besoin de capital était de 4,50M€ dans le scénario classique. La modélisation en logique floue permet donc à l'assureur d'économiser 140K€ de capital, soit 3,1% du besoin de capital initial dans le scénario classique.

	Besoin global de solvabilité	**Economie apportée (management action)**	**Economie apportée (logique floue)**
Scénario central	4,96M€	-	-
Scénario classique	4,50M€	**+460K€**	-
Scénario flou	4,36M€	**+460K€**	**+140K€**

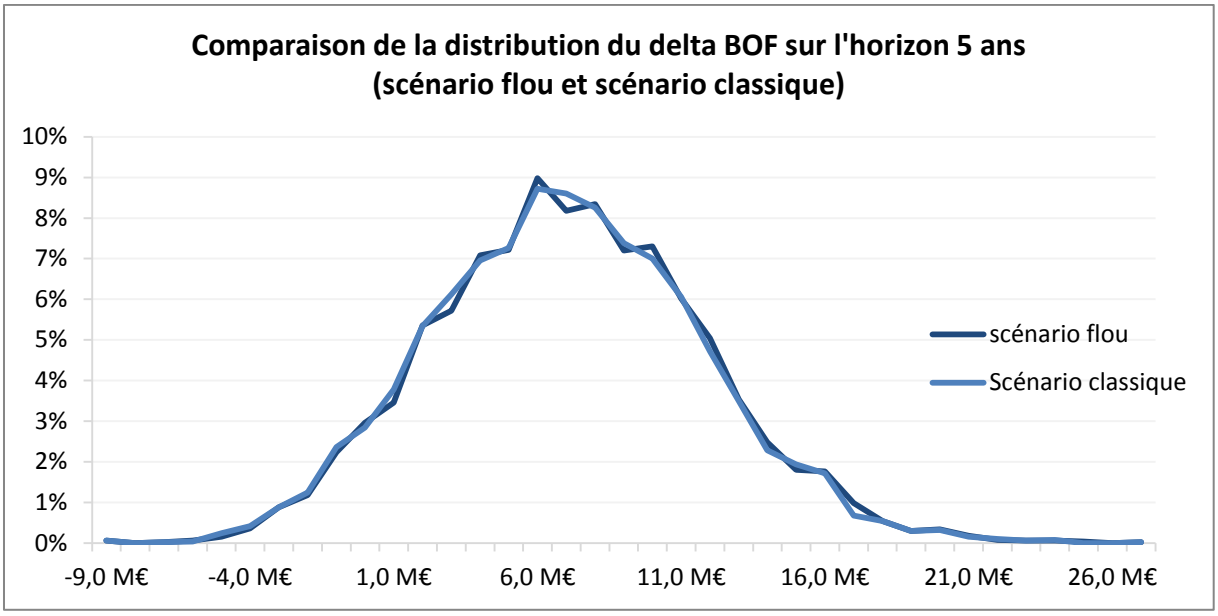


Figure 91 - Comparaison de la distribution du delta BOF entre le scénario classique et le scénario central

La comparaison de la distribution du delta BOF entre le scénario flou et le scénario classique montre le faible écart entre les deux simulations. L'allure de la distribution est relativement identique et les différences peu importantes.

Nous pouvons observer le delta BOF à différents niveaux de quantile.

Delta BOF (M€)	99,9%	99,5%	99%	90%	75%	50%
Scénario flou	-6,55	-4,36	-3,53	0,67	3,37	6,53
Scénario classique	-6,73	-4,50	-3,65	0,57	3,27	6,42
Différence	0,18	0,14	0,12	0,10	0,10	0,09

4. L'impact de la logique floue sur les simulations extrêmes

La distribution du delta BOF est constituée de 5000 simulations (nous avons 1000 variations du BOF par année sur notre horizon 5 ans). Dans les 5000 valeurs obtenues pour chaque scénario, il est important de noter que 1000 de ces valeurs (20%) sont calculées après un an de projection. Ces valeurs sont donc identiques entre les deux scénarios de modélisation du management action, la revalorisation tarifaire ne débutant qu'à l'issue de la première année.

Afin d'illustrer l'apport de la logique floue sur le besoin global de solvabilité, nous nous intéressons plus particulièrement aux valeurs extrêmes des deux distributions. Pour cela, nous affichons les différentes valeurs dans le 99ème centile. Pour chaque scénario, nous avons donc 50 observations (puisque nous avons 5000 variations du BOF).

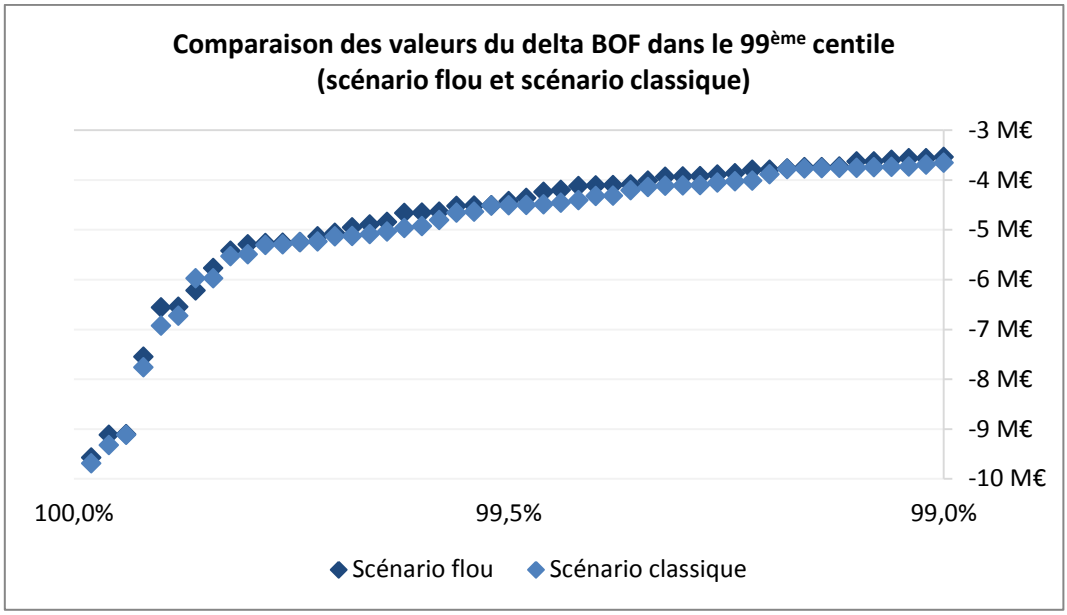


Figure 92 - Comparaison des valeurs du delta BOF dans le 99ème centile entre le scénario flou et le scénario classique

L'affichage de ces valeurs nous montre le bénéfice de la logique floue dans notre modèle. A niveau de risque identique, les simulations obtenues en logique classique nécessitent un besoin de capital plus important que les simulations obtenues en logique floue.

Notre observation sur le 99ème centile est également valable pour le 98ème centile. Nous observons les valeurs suivantes entre le 99ème et le 98ème centile :

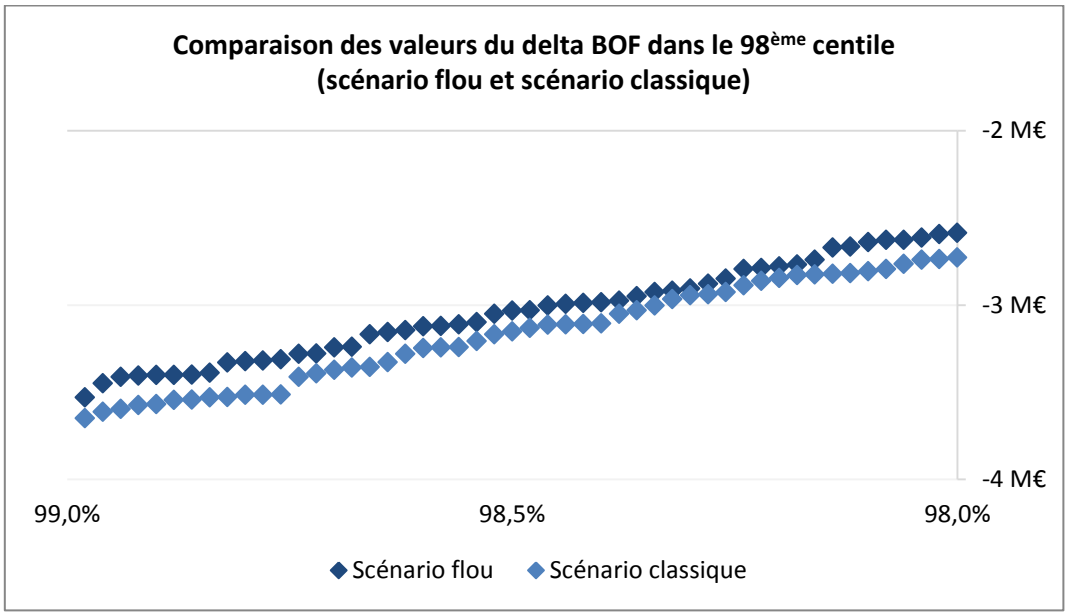


Figure 93 - Comparaison des valeurs du delta BOF entre le 98ème et le 99ème centile (scénarios flou et classique)

Afin d'illustrer l'apport de la logique floue, nous nous intéressons plus spécifiquement aux montants de delta BOF observés à fin 2017 présents dans ce 99ème centile. Les simulations en logique classique et en logique floue ne diffèrent alors que sur un seul paramètre, le taux de revalorisation utilisé au

cours de l'année 2017. La projection débute à fin 2015. Sur l'année 2016, les paramètres sont donc les mêmes entre le scénario classique et le scénario flou. A l'issue de l'année 2016, les simulations utilisent les mêmes paramètres pour déterminer ce taux de revalorisation. Pour une simulation donnée à fin 2016, le taux de couverture et les ratios combinés observés sur chaque branche sont identiques entre le scénario classique et le scénario flou. Les actions de management ne sont pas encore intervenues dans le modèle.

Sur ces montants de delta BOF issus de l'année 2017, nous avons 10 simulations en commun entre la modélisation avec la logique floue et la logique classique. Ces simulations sont dans le 99ème centile : cela signifie que la sinistralité observée sur l'année 2017 a entraîné des pertes importantes. La revalorisation appliquée à fin 2016 permet donc de nuancer cette perte. La logique floue n'a généré un résultat plus défavorable que pour 2 simulations (simulations 47 et 711). Pour les 8 autres simulations, la logique floue a permis d'obtenir un résultat moins défavorable qu'avec la logique classique. Nous pouvons visualiser la position de ces simulations sur le 99ème centile sur le graphique ci-dessous :

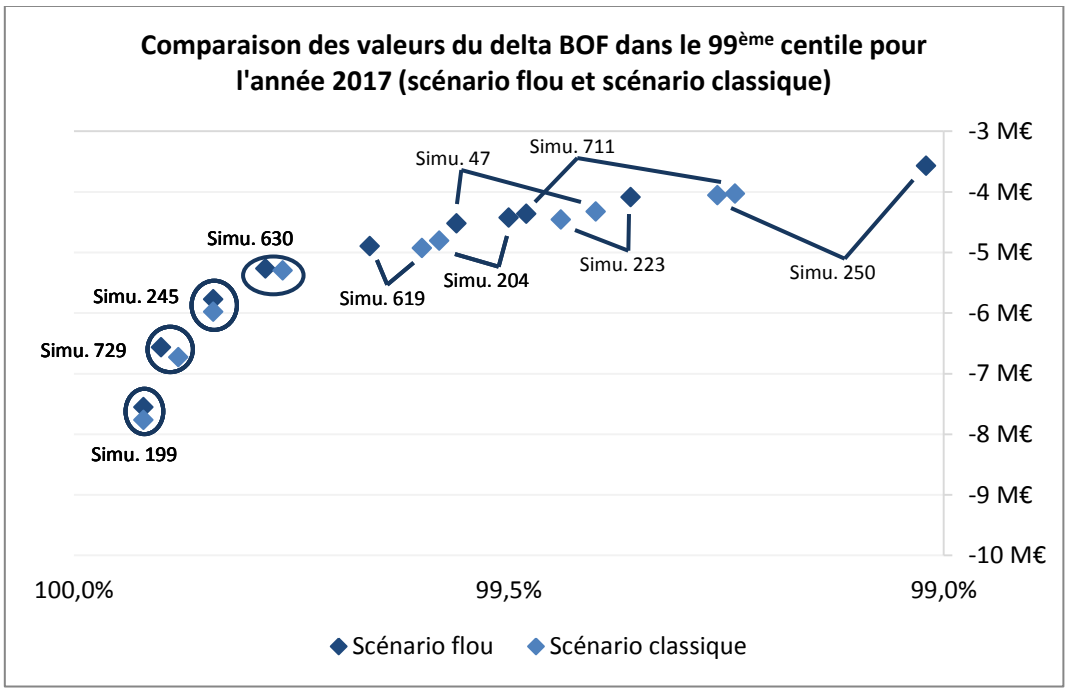


Figure 94 - Comparaison des valeurs du delta BOF dans le 99ème centile pour l'année 2017 (scénario flou et scénario classique)

Pour chaque simulation, nous récupérons le montant de revalorisation effectuée à l'issue de l'année 2016, sur chacune de nos branches. La logique floue n'est pas cantonnée aux bornes de la logique classique (-1%, 1%, 3,25% et 6,25%) et permet de nuancer plus finement la décision prise par les dirigeants.

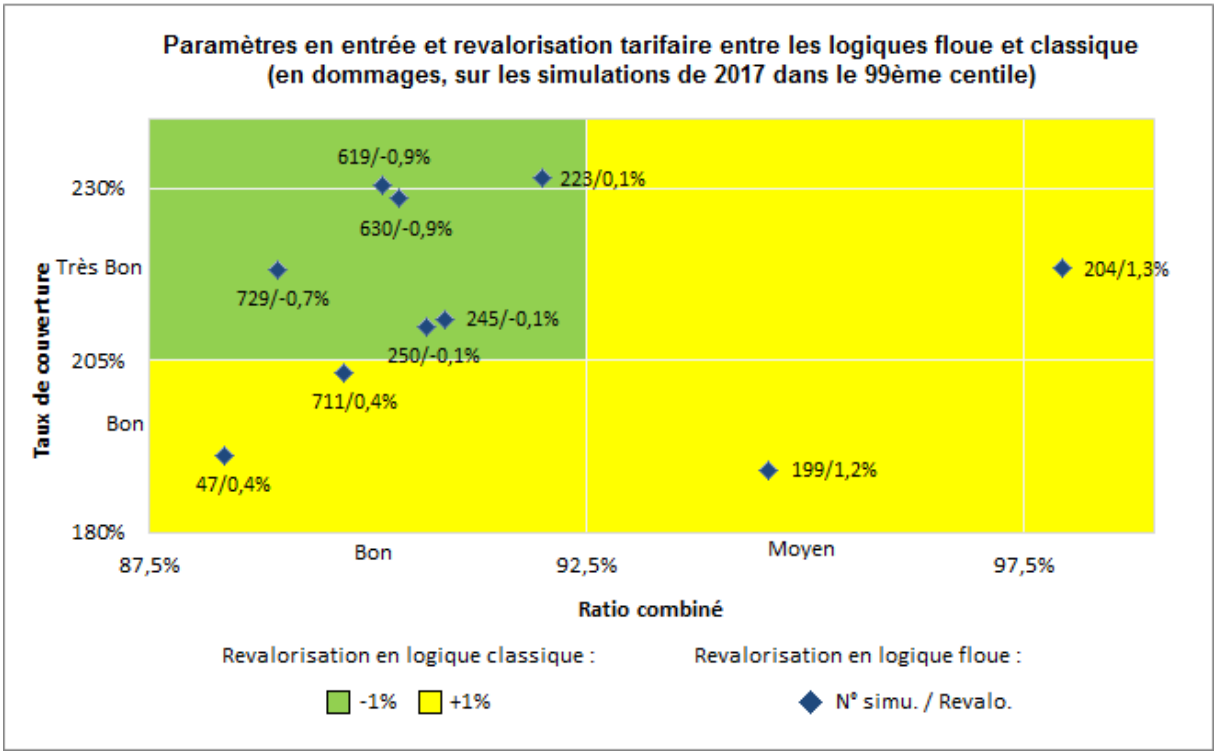


Figure 95 - Revalorisation sur 2017 pour les simulations avec un delta BOF à fin 2017 dans le 99ème centile (dommages)

Sur ces simulations, la branche dommages se porte relativement bien dans la plupart des cas observés, avec un ratio combiné considéré comme « bon » (inférieur à 92,5%). La bonne santé de la branche incite l'assureur à fidéliser ses assurés dans de nombreuses simulations. Lorsque le ratio combiné est « bon » et que le taux de couverture observé est « très bon » (supérieur à 205%), la décision de l'assureur est de fidéliser ses clients (zone verte en logique classique). Cela se traduit en logique classique par une revalorisation de -1%. En logique floue, cet effort tarifaire est atténué et dépend plus finement de la situation de l'assureur.

Sur les simulations 223, 245 et 250 plus particulièrement, la logique floue entraîne un geste commercial bien moins marqué que les -1% : la revalorisation est de -0,1% et même positive (0,1%) pour la simulation 223. Sur les simulations 245 et 250, cela s'explique par le taux de couverture observé à fin 2016 qui est tout juste « très bon ». Il est proche de la frontière à 205% entre les classes « bon » et « très bon » et la logique floue permet donc de nuancer la revalorisation à appliquer. Pour la simulation 223, c'est le ratio combiné observé sur l'année 2016 qui limite l'intervention de l'assureur. Le ratio combiné est proche de la frontière à 92,5% entre les classes « moyen » et « bon » et ne rassure pas complètement l'assureur au point d'effectuer une revalorisation de -1%.

Sur les simulations 47, 199, 204 et 711, l'assureur n'est pas pleinement satisfait de sa situation et décide d'augmenter légèrement ses tarifs. En logique classique, cette revalorisation est de 1%. En logique floue, elle est nuancée et elle va de 0,4% à 1,3%. Sur les simulations 47 et 711, la logique floue entraîne donc une revalorisation plus faible qu'en logique classique. C'est d'ailleurs sur ces deux simulations que la logique floue est plus défavorable que la logique classique en terme de besoin de capital. Sur ces simulations, notre modèle flou constate un ratio combiné « bon » à fin 2016 et nuance donc la revalorisation à appliquer au portefeuille. Sur les simulations 199 et 204, c'est l'inverse. Le modèle flou constate un ratio combiné « moyen » et applique une revalorisation

tarifaire plus forte. La simulation 204 a un meilleur taux de couverture du SCR que la simulation 199 mais le ratio combiné observé aux alentours de 98% n'incite pas le modèle flou à une revalorisation plus faible.

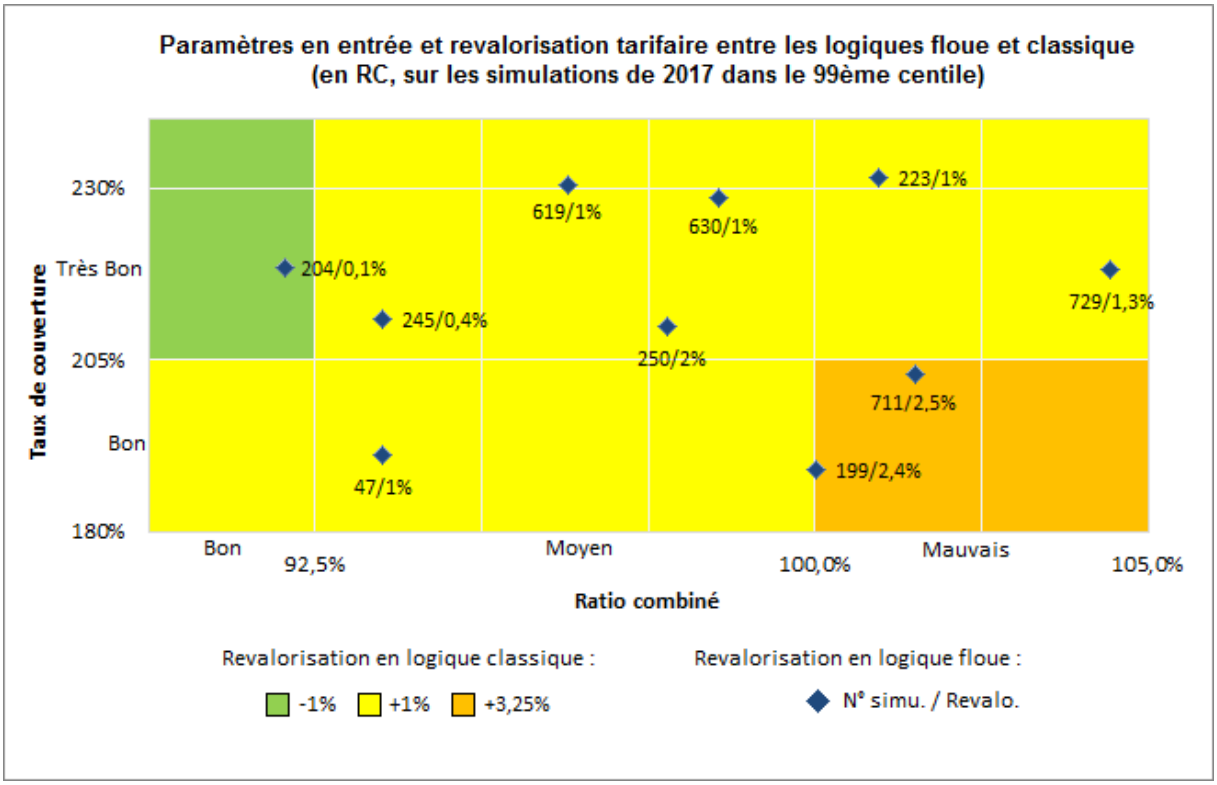


Figure 96 - Revalorisation sur 2017 pour les simulations avec un delta BOF à fin 2017 dans le 99ème centile (RC)

Sur la branche responsabilité civile, le ratio combiné plus précaire de l'assureur l'incite à augmenter son tarif dans de nombreuses simulations. Cela se traduit le plus souvent en logique classique par une revalorisation de 1% (zone en jaune) et dans certains cas par une revalorisation de 3,25% (zone orange). En logique floue, cette augmentation tarifaire est accentuée ou non en fonction de la situation précise de l'assureur.

Sur la simulation 199 par exemple, le ratio combiné observé sur 2016 est tout juste à la frontière à 100% entre un ratio « moyen » et un ratio « mauvais ». La logique classique ne tient pas compte de cette proximité et applique une revalorisation de 1% conformément à la matrice de décision (pour un taux de couverture « bon » et un ratio combiné « moyen »). La logique floue, elle, tient compte de cette nuance. Le ratio combiné est tout proche de la décision de revalorisation « modérée » (la zone orange en logique classique, avec une revalorisation de 3,25%) et le modèle flou applique donc une revalorisation plus élevée que les 1% observés en logique classique. La revalorisation est ainsi de 2,4%.

Sur la simulation 204, nous observons un phénomène semblable. Le ratio combiné est « bon » mais il est néanmoins proche de la frontière à 92,5% entre un ratio « bon » et un ratio « moyen ». La logique classique applique une fidélisation en baissant le tarif de 1% conformément à la matrice de décision (pour un taux de couverture « bon » et un ratio combiné « bon »). Le modèle flou, lui, tient compte de cette nuance et décide de revaloriser légèrement le tarif du fait du ratio combiné tout juste à la frontière, et applique une majoration de 0,1%.

Tout au long des simulations, la logique floue permet donc de nuancer les revalorisations effectuées en fonction de la situation de l'entreprise. Notre modèle considère des revalorisations qui ne sont pas cantonnées à un ensemble de valeurs déterminées lors du paramétrage comme en logique classique. Les revalorisations effectuées sont plus pertinentes, adaptées à la situation précise de l'entreprise et donc moins radicales qu'avec le scénario classique. Même si en moyenne la revalorisation apparaît proche entre les deux modélisations, la nuance apportée par la logique floue a un impact sur notre mesure de risque. Dans le cas de notre entreprise étudiée, la logique floue permet de diminuer le besoin global de solvabilité avec la nuance apportée.

Conclusion

L'objectif de notre mémoire était d'apporter des éléments de réponses à la problématique suivante : « Que peut apporter la logique floue dans la modélisation des management actions à un modèle ORSA en non-vie ? »

Pour cela, nous avons développé un modèle ORSA stochastique d'une assurance automobile possédant deux branches : une branche responsabilité civile et une branche dommages. Au sein de ce modèle, nous avons étudié plus spécifiquement l'utilisation d'un management action de revalorisation tarifaire. Cela nous a permis de ressortir plusieurs indicateurs clefs pour l'assureur : le ratio combiné sur chacune des branches, le taux de couverture du SCR, la distribution du résultat, la distribution du delta BOF et le besoin global de solvabilité.

Afin de mieux appréhender l'apport de la logique floue dans ce contexte, nous avons dans un premier temps jugé pertinent de comparer les indicateurs clefs de l'entreprise donnée par le modèle stochastique que nous avons développé, sans et avec la modélisation du management action de revalorisation tarifaire en logique binaire. Il en ressort que la modélisation de la politique tarifaire de l'assureur en fonction de l'environnement économique permet d'améliorer sensiblement les indicateurs implémentés grâce à un résultat technique plus cohérent et meilleur. En moyenne, son taux de couverture du SCR s'en trouve amélioré et le besoin global de solvabilité est moindre.

Dans un second temps, nous avons comparé les résultats du modèle ORSA en modélisant le management action de revalorisation tarifaire en logique floue. L'utilisation de la logique floue dans le cadre de la modélisation de la politique tarifaire permet de nuancer plus finement les décisions du top management au fil de la projection, en prenant en compte le niveau exact du taux de couverture et du ratio combiné de l'assureur. Ces valeurs ne sont pas cantonnées à des classes comme avec l'utilisation de la logique binaire mais bénéficient d'un degré d'appartenance à chaque classe en fonction de la valeur exacte des variables d'aide à la décision. Cela se traduit par un ensemble des décisions de revalorisation non linéaire et sans discontinuité.

Dans notre exemple, cette nuance apportée par la logique floue sur la revalorisation tarifaire a eu un impact bénéfique sur les différentes métriques de l'assureur. En moyenne, la revalorisation tarifaire est meilleure en logique floue et l'assureur améliore ses ratios combinés sur chaque branche. Il dégage donc chaque année un meilleur résultat. Ce résultat supplémentaire lui permet d'avoir un taux de couverture moyen du SCR sensiblement amélioré au fil de la projection. La logique floue a également un impact sur les valeurs extrêmes, avec un quantile à 99,5% qui s'améliore. Le besoin global de solvabilité en logique floue est donc moins élevé qu'en logique classique. Ce constat ne peut cependant pas être généralisé à plus grande échelle, il convient à chaque entreprise d'effectuer cette démarche afin d'en déduire si son besoin en capital peut ou non être revu à la baisse grâce à la logique floue.

Un autre avantage de la logique floue est de pouvoir moduler ce management action pour être au plus près de l'expertise du top management. Le management action de revalorisation tarifaire traduit les réelles décisions que pourraient être amenés à prendre les dirigeants, sans borner ces décisions à une valeur prédéterminée. Cela donne les moyens de retranscrire au mieux les appétences aux

risques définies par l'organe de direction. Cela pousse également l'expert à effectuer des simulations avec des scénarios plus ou moins stressés afin d'en déduire le calibrage de tous les paramètres de l'algorithme de commande floue. Il en ressort un outil de pilotage qui permet au top management de mieux comprendre les impacts de sa politique de revalorisation tarifaire et plus généralement des risques supportés par son entreprise. La matrice de décision peut donc, comme son nom l'indique, être utilisée comme un outil d'aide à la décision.

Tout le processus de mise en place de ce mécanisme de commande floue par les équipes opérationnelles permet de justifier les hypothèses prises, un calibrage robuste, avec l'utilisation de termes simples. La logique floue donne la possibilité de remplacer les algorithmes de réglage conventionnels par des règles linguistiques. La matrice de décision au cœur de ce mécanisme est donc facilement présentable à l'organe de direction pour l'aider dans la mise en place de leviers de pilotage. Cette matrice est également aisément utilisable dans le cadre du rapport ORSA.

La souplesse d'utilisation et la réactivité de mise à jour qu'accorde le mécanisme de commande floue contribue également à l'enrichissement des management actions au fil du temps suite aux observations du risque, aux évolutions stratégiques et aux différents échanges entre le top management et les équipes opérationnelles.

La commande floue permet de retranscrire la pensée humaine par la nuance qu'apportent les fonctions et les degrés d'appartenance, d'où l'importance de bien calibrer la matrice de décision.

L'affinage de notre algorithme de commande floue pourrait faire l'objet de réflexions supplémentaires, grâce à une meilleure expertise et l'introduction de nouvelles fonctions d'appartenance, tout en gardant à l'esprit que plus elles seront nombreuses, plus la matrice d'inférence sera grande et plus le coût en terme de temps de calcul sera élevé.

Nous avons pris certaines hypothèses simplificatrices pour développer notre modèle. Notre management action de revalorisation tarifaire a été développé en fonction des chiffres du marché. Chaque assureur ayant ses spécificités, il convient pour chaque entreprise d'affiner le calibrage de la commande floue pour se rapprocher au mieux de son profil de risque.

Bien que la matrice de décision puisse permettre de piloter plus facilement l'entreprise, l'expert et l'organe de direction se doivent de comprendre les tenants et aboutissants de cette logique floue qui propose un environnement mathématique complet avec de nombreux concepts qui peuvent paraître complexes. Le top management se doit donc d'appréhender en outre les mécanismes de fuzzification et de défuzzification ainsi que l'activation de Mamdani.

Nous avons démontré la puissance et l'adaptabilité de la logique floue, une nouvelle perspective serait d'appliquer ce mécanisme d'inférence à d'autres management actions tels que la réassurance ou à d'autres secteurs de l'assurance où il est primordial d'appréhender au mieux le comportement des assurés.

L'utilisation de la logique floue comme outil d'aide à la décision pourrait également trouver du sens dans le big data. En effet, avec le développement des objets connectés et des réseaux sociaux, le big data permet de délivrer un nombre considérable de données aux assureurs. Afin de personnaliser ses offres aux clients ou de mieux connaître le comportement de ses assurés en portefeuille, l'entreprise a l'occasion d'analyser intelligemment toutes ces données mises à sa disposition. Ces données provenant de différents canaux, elles ne sont pas forcément homogènes notamment dans l'identification des clients concernés. La logique floue permettrait d'essayer de rapprocher ces données hétérogènes avec les données déjà à disposition en interne. Plutôt que d'écarter une donnée si l'assureur n'est pas sûr à 100% de son rapprochement, la logique floue apporte une nuance dans son degré d'appartenance à un ensemble, à l'assureur de juger s'il y a de bonnes chances que ces données concernent le client dans son portefeuille ou non.

Dans un monde assurantiel en constante évolution, dans lequel les modèles deviennent de plus en plus sophistiqués et dans lequel la modélisation du comportement humain prend une place de plus en plus importante, la logique floue a un véritable rôle à jouer pour accompagner les actuaires dans leur quête perpétuelle de prévision de l'avenir.

Bibliographie

1. L'ORSA et la gestion des risques

- Articles et Publications

CAS (CASUALTY ACTUARIAL SOCIETY) – Overview of Enterprise Risk Management » – Mai 2003

CEIOPS (Committee of European Insurance and Occupational Pensions Supervisors) – « Own Risk and Solvency Assessment » – Issues Paper du 27 mai 2008, réf. CEIOPS-IGSRR-O9/08

CEIOPS (Committee of European Insurance and Occupational Pensions Supervisors) – « Issues Paper on ORSA - Feedback Statement » – Complément à l'Issues Paper du 27 mai 2008 (Pas de date), réf. CEIOPS- IGSRR-26/08

AAI (ASSOCIATION ACTUARIELLE INTERNATIONALE) – « Note on Enterprise Risk Management for Capital and Solvency Purposes in the Insurance Industry » – 31 mars 2009

LE PARLEMENT EUROPEEN – **«** Directive du Parlement européen et du conseil sur l'accès aux activités de l'assurance et de la réassurance et leur exercice (Solvabilité II) » – 25 novembre 2009, réf. PE-CONS 3643/6/09 REV 6

FIXAGE – «Pilier II : Aspects quantitatifs » – Journées d'études IARD 2012, 11 avril 2012

INSTITUT DES ACTUAIRES – « Groupe de travail ORSA » – Mars 2014

ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution) – « Préparation à Solvabilité II : Enseignements de l'exercice d'ORSA pilote 2013 » – 21 mars 2014

FIXAGE – « Mettre en place le Pilier 2 de Solvabilité II et préparer l'ORSA de 2014 » – Formation homologuée par l'IA, mars 2014

ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution) – « Analyses et Synthèses n°33 : La situation des principaux organismes d'assurance en 2013 » – Juillet 2014

ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution) – « Analyses et Synthèses n°41 : Analyse de l'exercice 2014 de préparation à Solvabilité II » – Février 2015

ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution) – « Analyses et Synthèses n°52 : La situation des principaux organismes d'assurance en 2014 » – Juillet 2015

EIOPA (European Insurance and Occupational Pensions Authority) – « Orientations relatives à l'évaluation interne des risques et de la solvabilité » – Guideline du 14 septembre 2015, réf. EIOPA-BoS-14/259 FR

EIOPA (European Insurance and Occupational Pensions Authority) – « Orientations relatives au système de gouvernance » – Guideline du 14 septembre 2015, réf. EIOPA-BoS-14/253 FR

ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution) – « Analyses et Synthèses n°56 : Analyse de l'exercice 2015 de préparation à Solvabilité II » – Décembre 2015

ACPR (Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution) – « Analyses et Synthèses n°72 : La situation des principaux organismes d'assurance en 2015 » – Septembre 2016

- Mémoires d'actuariat

Alban MARSOIN - « L'ORSA : mise en place d'un dispositif de gestion des risques en assurance Non Vie. » - Mémoire d'Actuariat, 2011

Candice ELMALEH – « Solvabilité II : ORSA, des principes clés à la mise en œuvre opérationnelle » - Mémoire d'Actuariat, 2012

- Ouvrages

DENUIT, M. & CHARPENTIER, A. – « Mathématiques de l'assurance non-vie » – ECONOMICA 2004

2. La Logique floue

- Articles et Publications

Gilles BALMISSE – « La logique floue » – Septembre 2002

Changki KIM – « Modeling surrender/lapse rates and valuing surrender options in Korean interest indexed annuities » – 2003

Jorge de Andres SANCHEZ, Antonio Terceno GOMEZ – « Estimating a term structure of interest rates for fuzzy financial pricing by using fuzzy regression methods » – SCIENCEDIRECT 2003

Arnold F. SHAPIRO – « Fuzzy Logic in insurance » – SCIENCEDIRECT 2004

Arnold F. SHAPIRO – « Fuzzy Regression end the Term Structures of Intersest Rates Revisited » – 2004

- Mémoires d'actuariat

Sylvain DETROULLEAU / Sandrine MOURET – « Modèle ALM : Apport de la Logique Floue dans la modélisation des comportements » - Mémoire d'Actuariat, 2013

- Ouvrages

Didier DUBOIS, Henri PRADE – « Fuzzy Sets and Systems : Theory and Application » – MATHEMATICS IN SCIENCE AND ENGINEERING 1980

Krzysztof OSTASZEWSKI, A.S.A. – « An Investigation into Possible Applications of Fuzzy Set Methods in Actuarial science » – THE SOCIETY OF ACTUARIES 1993

Bernadette BOUCHON-MEUNIER – « La logique floue et ses applications » – ADDISON-WESLEY 1995

Louis GACOGNE – « Eléments de logique floue » – HERMES 1997

Table des illustrations

Figure 1 - Calendrier de la directive Solvabilité II 14
Figure 2 - Les étapes clés d'un processus ORSA 26
Figure 3 - Utilisation de l'ORSA dans le processus de gestion des risques 29
Figure 4 - Les management actions dans l'ORSA 32
Figure 5 - Sous-ensemble classique de U 36
Figure 6 - Fonctions d'appartenance régulières 37
Figure 7 - Intervalles flous 37
Figure 8 - Fonction d'appartenance triangulaire 38
Figure 9 - Caractéristiques d'un ensemble flou 39
Figure 10 - Ensembles flous liés à la taille d'un homme 40
Figure 11 - Intersection des sous-ensembles « petit » et « moyen » 40
Figure 12 - Union des sous-ensembles « petit » et « moyen » 41
Figure 13 -Complémentaire du sous-ensemble « petit » 42
Figure 14 - Liste de t-normes connues 42
Figure 15 - Liste de t-conormes connues 43
Figure 16 - Principe d'extension de Zadeh 44
Figure 17 - Image d'un sous-ensemble ordinaire 44
Figure 18 - Image floue d'un sous-ensemble flou 45
Figure 19 - Tables de vérité en logique trivaluée 46
Figure 20 - Partition de l'univers liée à la taille d'un homme 49
Figure 21 - Fuzzification de la variable « service » 49
Figure 22 - Fuzzification de la variable « nourriture » 50
Figure 23 - Fuzzification de la variable « pourboire » 50
Figure 24 - Règle d'inférence 1 50
Figure 25 - Règle d'inférence 2 51
Figure 26 - Règle d'inférence 3 51
Figure 27 - Inférence de Mamdani : étapes de l'agrégation et de l'activation 52
Figure 28 - Inférence de Mamdani : étape de l'agrégation des conclusions 53
Figure 29 - Défuzzification : méthode du premier maximum 53
Figure 30 - Défuzzification : méthode de la moyenne des maximums 54
Figure 31 - Défuzzification : méthode du centre de gravité 54
Figure 32 - Mécanisme de la commande floue 55
Figure 33 - Exemple d'ensemble des décisions en logique floue 58
Figure 34 - Schéma de fonctionnement de notre modèle stochastique 63
Figure 35 - Bilan simplifié d'un assureur 73
Figure 36 - Impact sur le taux de croissance du portefeuille en fonction du taux de revalorisation tarifaire 79
Figure 37 - Fonctions d'appartenance du ratio combiné flou 81
Figure 38 - Fonctions d'appartenance du ratio de couverture flou 82
Figure 39 - Fonctions d'appartenance de l'évolution tarifaire floue 83
Figure 40 - Matrice d'inférence de notre mécanisme de commande floue 83

Figure 41 - Exemple de règle floue implémentée dans notre modèle 84
Figure 42 - Exemple de mécanisme d'inférence 86
Figure 43 - Agrégation des conclusions 87
Figure 44 - Défuzzification : méthode du premier maximum 87
Figure 45 - Défuzzification : méthode de la moyenne des maximums 88
Figure 46 - Défuzzification : méthode du centre de gravité 88
Figure 47 - Ensemble des décisions pour le management action de revalorisation tarifaire en logique floue 89
Figure 48 - Classes définies pour le management action de revalorisation tarifaire en logique classique 90
Figure 49 – Classes définies pour le management action de revalorisation tarifaire en logique classique (2) 91
Figure 50 - Matrice de décisions en logique classique 91
Figure 51 - Ensemble des décisions pour le management action de revalorisation tarifaire en logique classique 92
Figure 52 - Comparaison de l'ensemble des décisions entre la logique floue et la logique classique .. 93
Figure 53 - Détermination du taux de revalorisations minimale et maximale en logique floue 94
Figure 54 - Ensemble des décisions sur la tranche 140%-160% du taux de couverture du SCR 95
Figure 55 - Matrice de décisions pour un taux de couverture du SCR « mauvais » en logique classique 96
Figure 56 - Ensemble des décisions sur la tranche 190%-220% du taux de couverture du SCR 97
Figure 57 - Matrice de décisions pour un taux de couverture du SCR « bon » ou « très bon » en logique classique 98
Figure 58 - Répartition de l'actif de l'assureur non-vie 101
Figure 59 - Cadence de règlement des deux branches modélisées 102
Figure 60 - Ratio combiné par branche modélisée 104
Figure 61 - Bilan S2 de l'assureur non-vie au début de la projection 106
Figure 62 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par simulation 107
Figure 63 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par année de projection 108
Figure 64 - Compte de résultat simplifié de l'assureur non-vie 109
Figure 65 - Provenance en moyenne du résultat, pour 100€, dans le scénario central 109
Figure 66 - Evolution du résultat moyen et du nombre de contrats, dans le scénario central 110
Figure 67 - Evolution moyenne du bilan de l'assureur chaque année, dans le scénario central 111
Figure 68 - Evolution du taux de couverture moyen du SCR, dans le scénario central 112
Figure 69 - Distribution du taux de couverture du SCR (scénario central) 112
Figure 70 - Distribution du delta BOF sur l'horizon 5 ans, dans le scénario central 113
Figure 71 -Revalorisation tarifaire moyenne par branche, dans le scénario classique 115
Figure 72 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par année de projection (scénario classique) 116
Figure 73 - Comparaison de l'évolution du ratio combiné moyen entre les scénarios classique et central 117
Figure 74 - Evolution du résultat moyen et du nombre de contrats, dans le scénario classique 118
Figure 75 - Comparaison du résultat moyen entre le scénario classique et le scénario central 118
Figure 76 - Evolution du taux de couverture moyen du SCR, dans les scénarios classique et central 119
Figure 77 - Distribution du taux de couverture du SCR (scénario classique) 119

Figure 78 - Comparaison du quantile à 5% du taux de couverture du SCR, entre le scénario classique et le scénario central 120
Figure 79 - Distribution du delta BOF sur l'horizon 5 ans, dans le scénario classique 120
Figure 80 - Comparaison de la distribution du delta BOF entre le scénario classique et le scénario central 121
Figure 81 - Comparaison de la revalorisation tarifaire moyenne en dommages, entre le scénario classique et le scénario flou 123
Figure 82 - Comparaison de la revalorisation tarifaire moyenne en RC, entre le scénario classique et le scénario flou 123
Figure 83 - Les différents ratios combinés obtenus sur les deux branches par année de projection (scénario flou) 124
Figure 84 - Comparaison de l'évolution du ratio combiné moyen entre les scénarios flou et classique 125
Figure 85 - Evolution du résultat moyen et du nombre de contrats, dans le scénario flou 126
Figure 86 - Comparaison du résultat moyen entre le scénario flou et le scénario classique 126
Figure 87 - Evolution du taux de couverture moyen du SCR, dans le scénario flou 127
Figure 88 - Distribution du taux de couverture du SCR (scénario flou) 128
Figure 89 - Evolution moyenne du bilan de l'assureur chaque année, dans le scénario flou 128
Figure 90 - Distribution du delta BOF sur l'horizon 5 ans, dans le scénario flou 129
Figure 91 - Comparaison de la distribution du delta BOF entre le scénario classique et le scénario central 130
Figure 92 - Comparaison des valeurs du delta BOF dans le 99ème centile entre le scénario flou et le scénario classique 131
Figure 93 - Comparaison des valeurs du delta BOF entre le 98ème et le 99ème centile (scénarios flou et classique) 131
Figure 94 - Comparaison des valeurs du delta BOF dans le 99ème centile pour l'année 2017 (scénario flou et scénario classique) 132
Figure 95 - Revalorisation sur 2017 pour les simulations avec un delta BOF à fin 2017 dans le 99ème centile (dommages) 133
Figure 96 - Revalorisation sur 2017 pour les simulations avec un delta BOF à fin 2017 dans le 99ème centile (RC) 134