



المندوبية السامية للتخطيط  
HAUT-COMMISSARIAT AU PLAN

ROYAUME DU MAROC  
\*.\_\*.\_\*.\_\*  
HAUT COMMISSARIAT AU PLAN  
\*.\_\*.\_\*.\_\*.\_\*.\_\*  
INSTITUT NATIONAL  
DE STATISTIQUE ET D'ECONOMIE APPLIQUEE



**INSEA**

## Projet de Fin d'Etudes

\*\*\*\*\*

**Etude d'optimisation de programme de  
réassurance dans le cadre  
d'une évaluation ORSA**

Préparé par : *Mme Siham BOUALI*  
*Mme Ghizlane EN-NAHI*

Sous la direction de : *M. Fouad MARRI* (INSEA)  
*Mme Morjana ALAOUI MRANI* (Forvis Mazars)

*Soutenu publiquement comme exigence partielle en vue de l'obtention du*

**Diplôme d'Ingénieur d'Etat**

**Filière : Actuariat-Finance**

*Devant le jury composé de :*

- *M. Fouad MARRI* ( INSEA)
- *Mme Fadoua ZEDDOUK* ( INSEA)
- *Mme Morjana ALAOUI MRANI* (Forvis Mazars)



# Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement l'ensemble de l'équipe actuariat de FORVIS MAZARS pour leur soutien, leur disponibilité et leur bienveillance tout au long de ce stage.

Nous adressons une mention particulière à notre encadrante, Mme Morjana ALAOUI MRANI, pour ses conseils éclairés, sa rigueur professionnelle, et le temps précieux qu'elle nous a consacré.

Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à M. Fouad MARRI, notre encadrant pédagogique, qui a non seulement accepté de nous accompagner dans ce projet, mais aussi de nous initier à l'univers passionnant de l'actuariat. C'est grâce à son enseignement rigoureux, sa pédagogie vivante et son engagement constant que nous avons pu poser les bases solides de notre parcours et donner à ce projet toute sa portée et sa cohérence.

Nous remercions également Mme Fadoua ZEDDOUK pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, nos remerciements s'adressent à l'ensemble du corps professoral de l'INSEA. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de notre formation.

# Dédicaces

*Je dédie ce travail, en marque de respect et de reconnaissance profonde :*

*À mes parents,*

*À ma mère, dont les yeux n'ont jamais laissé transparaître les sacrifices consentis pour illuminer ma vie. Ce que tu as offert laissera une marque inébranlable, éternellement ancrée, que rien ne pourra combler.*

*À mon père, barrière invisible face aux aléas. C'est grâce à toi que mon esprit est serein, protégé des agitations extérieures, capable de se concentrer pleinement sur l'essentiel.*

*Après Allah, c'est à vous que je suis redevable.*

*À mes petites sœurs, Sanaâ, Ouiame et Aya,*

*Pour vos instants d'écoute précieuse, votre disponibilité sans faille, et ces petits gestes de service qui pèsent autant que le monde entier, ainsi que pour votre joie contagieuse, qui a toujours été une force motrice et un souffle d'espoir.*

*À Ghizlane,*

*Pour ton sérieux, ton respect, et tout ce que tu as accompli avec cœur et engagement, afin de porter ce travail vers le meilleur.*

*À moi,*

*celle qui n'a jamais cessé de rêver, et qui continue d'entretenir l'espoir et la force d'avancer.*

*À tout esprit libre et insoumis,  
qui brave les attentes et les jugements, là où ce qui est juste demeure simplement juste.*

*Siham*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail du fond du cœur, en signe de respect et d'amour :*

*À mes parents,*

*À ceux qui, après Allah, m'ont donnée la vie. Merci pour votre amour infini, vos sacrifices silencieux, et votre foi inébranlable en moi. Puisse Allah vous accorder santé, sérénité et longue vie.*

*À mes frères et sœurs,*

*Pour leur soutien constant et affectueux, leur patience, et cette force discrète qu'ils m'ont toujours transmise. Merci d'avoir été là, dans l'ombre comme dans la lumière, guidant mes pas, éclairant mes choix. Vous êtes les veilleurs discrets de cette réussite.*

*À mes enseignants,*

*De l'école primaire jusqu'à l'institut, pour avoir éveillé en moi la curiosité, nourri l'ambition, et tracé les premiers traits du chemin que je poursuis aujourd'hui.*

*À mon amie et binôme, Siham,*

*Sans toi, cette aventure n'aurait pas eu la même force. Merci pour ta présence, ta patience, ton soutien et ta complicité tout au long du chemin.*

*À mes amies*

*Pour leur présence fidèle, leurs encouragements sincères, et leur capacité à rendre légères même les épreuves les plus lourdes.*

*À moi-même,*

*Pour avoir persévéré, douté sans renoncer, et avancé malgré les vents contraires.*

*Et enfin,*

*À celles et ceux qui luttent chaque jour pour leur dignité, leur liberté et leur avenir, en particulier au peuple de Gaza. Que cette modeste réussite soit un hommage à leur courage et à leur résilience inépuisable.*

*Ghizlane*

---

# Résumé / Abstract

---

## Résumé

Dans un contexte réglementaire en constante évolution, la gestion des risques et la maîtrise de la solvabilité sont devenues des enjeux majeurs pour les compagnies d'assurance. Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le cadre de l'évaluation ORSA (Own Risk and Solvency Assessment) et s'intéresse plus particulièrement à l'optimisation de la stratégie de réassurance pour un produit d'assurance vie épargne.

La première partie de ce mémoire est consacrée à une description du cadre réglementaire de la Solvabilité Basée sur les Risques (SBR), en détaillant les trois piliers de la réglementation, notamment le calcul des exigences de capital (SCR et MCR), la gouvernance des risques, et les exigences de reporting. Ensuite, une revue approfondie des mécanismes de réassurance est présentée, en exposant ses formes, sa tarification et ses impacts financiers et prudentiels.

La seconde partie du travail est axée sur la modélisation économique et actuarielle du bilan d'un produit d'épargne. Nous y développons un modèle ALM (Asset Liability Management) intégrant les principales sources de risques, telles que le risque de taux, le risque de rachat et le risque de mortalité. Des hypothèses de projection prudentes sont formulées, permettant de simuler les évolutions des actifs, des passifs et des fonds propres dans un cadre dynamique.

Enfin, une approche d'optimisation de la stratégie de réassurance est mise en œuvre, à travers deux méthodes : une approche classique par programmation non linéaire sous contraintes, et une approche par algorithme génétique multi-objectif (NSGA-II), visant à trouver le meilleur compromis entre le ratio de solvabilité et la rentabilité (ROE). Des scénarios de stress sont également analysés afin d'évaluer la robustesse des solutions retenues face à des chocs adverses.

Les résultats obtenus permettent de démontrer l'apport significatif de la réassurance dans l'amélioration des indicateurs prudentiels et financiers de la compagnie, tout en soulignant l'intérêt

d'une approche d'optimisation adaptée au profil de risque spécifique du produit.

**Mots-clés :** Gestion de risques, solvabilité, ORSA, optimisation, réassurance, épargne, SBR, ALM, SCR, risque de rachat, risque de mortalité, risque de taux, NSGA-II, algorithmes génétiques, ratio de solvabilité, ROE, scénarios de stress.

## Abstract

In a constantly evolving regulatory environment, risk management and solvency control have become major challenges for insurance companies. This final-year project as a part of the Own Risk and Solvency Assessment (ORSA), focuses specifically on optimizing the reinsurance strategy for a life savings insurance product.

The first part of this thesis is dedicated to understanding the theory behind regulatory framework of Risk-Based Solvency (RBS), detailing the three pillars of the regulation, including the calculation of capital requirements (SCR and MCR), risk governance, and reporting obligations. This is followed by an in-depth review of reinsurance mechanisms, presenting its forms, pricing methods, and financial and prudential impacts.

The second part of the work focuses on the economic and actuarial modeling of the balance sheet for a savings product. We developed an Asset-Liability Management (ALM) model that integrates major sources of risk, such as interest rate risk, lapse risk, and mortality risk. Prudent projection assumptions are defined, allowing for simulations of the evolution of assets, liabilities, and own funds in a dynamic framework.

Finally, a reinsurance strategy optimization approach is implemented through two methods : a classical nonlinear constrained programming method, and a multi-objective genetic algorithm (NSGA-II), aiming to identify the best trade-off between the solvency ratio and profitability (ROE). Stress test scenarios are also analyzed to assess the robustness of the proposed solutions under adverse conditions.

The results obtained highlight the significant contribution of reinsurance to improving the prudential and financial indicators of the company, while emphasizing the relevance of an optimization approach tailored to the specific risk profile of the product.

**Keywords :** Risk management, solvency, ORSA, optimization, reinsurance, savings, RBS, ALM, SCR, lapse risk, mortality risk, interest rate risk, NSGA-II, genetic algorithms, solvency ratio, ROE, stress scenarios.

# Table des matières

Résumé / Abstract . . . . .	6
Introduction . . . . .	14
<b>1 Présentation de l'organisme d'accueil : Forvis Mazars</b>	<b>15</b>
<b>2 Solvabilité basée sur les risques (SBR)</b>	<b>17</b>
2.1 Pilier 1 . . . . .	18
2.1.1 Fonds propres . . . . .	19
2.1.1.1 Capital de Solvabilité Requis (SCR) . . . . .	19
2.1.1.2 Minimum de solvabilité requis (MCR) . . . . .	23
2.1.2 Provisions techniques . . . . .	24
2.1.2.1 Le Best Estimate (BE) . . . . .	24
2.1.2.2 La Marge de risque (RM) . . . . .	25
2.1.2.3 Courbe de taux pour l'actualisation des flux futurs . . . . .	26
2.2 Pilier 2 . . . . .	28
2.2.1 Gouvernance . . . . .	29
2.2.2 ORSA : Own Risk and Solvency Assessment . . . . .	30
2.2.2.1 Le profil de risque . . . . .	31
2.2.2.2 La stratégie de gestion des risques . . . . .	32
2.2.2.3 Le processus de suivi de l'activité . . . . .	33
2.3 Pilier 3 . . . . .	34
<b>3 Réassurance</b>	<b>35</b>
3.1 Généralités . . . . .	35
3.1.1 Histoire . . . . .	35
3.1.2 Définition . . . . .	36
3.1.3 Les formes traditionnelles de Réassurance . . . . .	37
3.1.3.1 Juridiques . . . . .	37
3.1.3.2 Techniques . . . . .	38

3.1.4	Tarification . . . . .	44
3.1.4.1	Traitement de l'historique sinistre . . . . .	44
3.1.4.2	Modèle basé sur l'expérience : Burning cost (Le taux de flambage) . . . . .	44
3.1.4.3	Modèle probabiliste . . . . .	45
3.2	Impact de la réassurance . . . . .	46
3.2.1	Impact de la réassurance sur le résultat net . . . . .	47
3.2.2	Impact de la réassurance sur le pilier 1 . . . . .	48
3.3	Optimisation de la stratégie de réassurance . . . . .	49
3.3.1	Optimisation non linéaire sous contraintes : approche classique . . . . .	50
3.3.2	Méthodes d'optimisation multi-objectif . . . . .	51
3.3.3	Algorithmes génétiques . . . . .	52
3.3.3.1	Pourquoi choisir un algorithme génétique? . . . . .	52
3.3.3.2	Contexte général . . . . .	53
3.3.3.3	Éléments de base pour le fonctionnement des algorithmes génétiques . . . . .	53
3.3.3.4	Fonctionnement général des algorithmes génétiques . . . . .	55
3.3.3.5	Algorithmes génétiques : Formulation mathématique . . . . .	56
3.3.3.6	NSGA-II . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Optimisation du programme de réassurance dans le cadre de l'évaluation ORSA pour un produit d'épargne</b>	<b>63</b>
4.1	Assurance vie épargne . . . . .	63
4.1.1	Les supports d'investissement . . . . .	63
4.1.2	Les risques majeurs liés à l'activité épargne . . . . .	64
4.1.2.1	Risque action et immobilier . . . . .	64
4.1.2.2	Risque de taux . . . . .	64
4.1.2.3	Le risque de rachat . . . . .	65
4.2	Présentation et caractéristiques du produit . . . . .	65
4.3	Gestion Actif / Passif . . . . .	66
4.3.1	Hypothèses de projection du bilan prudentiel & business plan . . . . .	66
4.3.2	Modèle ALM . . . . .	67
4.3.3	Viellissement du passif . . . . .	68
4.3.3.1	Prestation rachat . . . . .	68
4.3.3.2	Prestation décès . . . . .	69
4.3.3.3	Frais et chargements . . . . .	69
4.3.3.4	Provision pour participation aux bénéfices . . . . .	70

4.3.3.5	Provision mathématique . . . . .	71
4.3.3.6	Fonds propres . . . . .	72
4.3.3.7	Réserve de capitalisation . . . . .	72
4.3.4	Vieillessement de l'actif . . . . .	72
4.3.4.1	Modélisation des obligations : Modèle de Vasicek . . . . .	73
4.3.4.2	Modélisation du cours des actions et immobiliers : Modèle de Black & Scholes . . . . .	79
4.3.4.3	Flux monétaires . . . . .	81
4.3.5	Encaissements et décaissements de la trésorerie . . . . .	81
4.3.6	Réallocation des actifs . . . . .	81
4.3.7	Bilan Actif-Passif . . . . .	81
4.3.8	Compte de résultat . . . . .	82
4.4	Projection des éléments du pilier 1 de la norme SBR . . . . .	83
4.4.1	Projection du Capital de Solvabilité Requis (SCR) . . . . .	83
4.4.1.1	Projection du SCR marché . . . . .	83
4.4.1.2	Projection du SCR souscription vie . . . . .	86
4.4.1.3	Projection du SCR concentration . . . . .	90
4.4.1.4	Projection du SCR Contrepartie . . . . .	91
4.4.1.5	Projection du SCR opérationnel . . . . .	92
4.4.1.6	Projection du SCR global . . . . .	92
4.4.2	Projection des fonds propres . . . . .	93
4.4.3	Projection des provisions techniques . . . . .	93
4.4.3.1	Projection de la meilleure estimation . . . . .	93
4.4.3.2	Projection de la Marge de Risque . . . . .	94
4.5	Scénarios de stress . . . . .	94
4.5.1	Sous-risque rachat . . . . .	95
4.5.2	Sous-risque mortalité . . . . .	95
4.5.3	Recalibrage du sous-risque taux . . . . .	96
4.6	Optimisation de la réassurance & résultat . . . . .	101
4.6.1	Optimisation . . . . .	102
4.6.1.1	Optimisation non linéaire (PNL) . . . . .	102
4.6.1.2	Optimisation par algorithme génétique(optimisation multi-objectif) . . . . .	104
4.6.2	Résultats et comparaison . . . . .	106
	<b>Conclusion</b>	<b>108</b>
	<b>Annexe</b>	<b>109</b>

---

5.1	Résultats obtenus par le programme combinant une couverture en excédent de sinistre (XS) et un traité en quote-part. . . . .	109
5.2	Démonstration du prix ZC . . . . .	110
5.3	Résultats de sensibilité de la solvabilité et de la rentabilité de la compagnie aux stress tests . . . . .	111
5.3.1	Sensibilité du ratio de solvabilité et du Return on Equity aux stress de rachat . . . . .	111
5.3.2	Sensibilité du ratio de solvabilité et du Return on Equity aux stress de mortalité . . . . .	113
	Bibliographie . . . . .	114

# Table des figures

2.1	Les trois piliers de la réforme SBR . . . . .	18
2.2	Le pilier 1 de SBR . . . . .	18
2.3	Les composantes du SCR . . . . .	20
2.4	Cartographie exhaustive des risques . . . . .	31
3.1	Les niveaux d'assurance et de réassurance . . . . .	36
3.2	Exemple de traité QP à 30% de cession . . . . .	39
3.3	Exemple d'excédent de plein . . . . .	40
3.4	Exemple d'excédent de sinistre . . . . .	43
3.5	Bilan économique avec réassurance . . . . .	47
3.6	Frontière efficiente et traités optimaux de réassurance . . . . .	55
3.7	Etapes de l'algorithme NSGA-II . . . . .	59
3.8	Illustration graphique de la sélection des individus . . . . .	60
4.1	Evolution des provisions mathématiques . . . . .	72
4.2	Taux moyen pondéré de 2012 à 2025 . . . . .	75
4.3	Simulation du taux vasicek . . . . .	75
4.4	La courbe des taux . . . . .	77
4.5	Illustration du taux forward . . . . .	78
4.6	QQ-plot des rendements-actions . . . . .	80
4.7	Tests de normalité des rendements . . . . .	80
4.8	Simulation des prix des actions . . . . .	80
4.9	Impact des stress tests de Rachat sur RS . . . . .	95
4.10	Impact des stress tests de Rachat sur ROE . . . . .	95
4.11	Impact des stress tests de Mortalité sur RS . . . . .	96
4.12	Impact des stress tests de Mortalité sur ROE . . . . .	96
4.13	Taux d'émission des bons du Trésor . . . . .	97
4.14	Variation des quatre composantes principales . . . . .	98

---

4.15	Variation des quatre composantes principales . . . . .	99
4.16	Ratio de solvabilité (PNL) . . . . .	103
4.17	Return on equity (PNL) . . . . .	103
4.18	frontière de Pareto . . . . .	105
4.19	Ratio de solvabilité (NSGA-II) . . . . .	107
4.20	Return on equity (NSGA-II) . . . . .	107
5.21	Ratio de solvabilité QP& XS . . . . .	109
5.22	Return on equity QP& XS . . . . .	109

# Introduction

Ce projet met en lumière une problématique centrale pour les assureurs : la nécessité de transférer une partie des risques à des réassureurs. L'objectif est d'identifier un programme de réassurance optimal, permettant de garantir un équilibre entre solvabilité et rentabilité, tout en renforçant la capacité d'absorption des chocs futurs.

Notre étude, intitulée « Optimisation de programme de réassurance dans le cadre de l'évaluation ORSA », s'inscrit dans une démarche prospective alignée sur la stratégie de l'entreprise. Elle vise à intégrer pleinement la réassurance dans le processus d'évaluation interne des risques et de la solvabilité (ORSA).

Dans un premier temps, nous procéderons à la projection des composantes prudentielles ainsi que des éléments du business plan, en partant d'une situation initiale sans réassurance, et ce par nature du produit. Ces projections constitueront la base de construction du scénario central, en cohérence avec la trajectoire stratégique de l'entreprise.

Ensuite, une cartographie des risques sera élaborée, en identifiant les risques ayant un impact potentiel sur la compagnie, afin de les recalibrer et de mettre en œuvre des actions adaptées. Cette analyse servira de socle pour évaluer dans quelle mesure l'entreprise respecte son appétence au risque vis-à-vis du produit étudié, à travers des indicateurs pertinents de solvabilité, de performance et de rentabilité. Des seuils ainsi que des positions cibles seront alors définis, afin d'encadrer la tolérance au risque de manière rigoureuse et conforme aux objectifs stratégiques de l'entreprise.

Enfin, des tests de résistance seront menés sur la base de l'appétence au risque définie. Ces scénarios de stress permettront d'évaluer la robustesse du programme de réassurance face à différents chocs. À partir de ces résultats, les paramètres du programme seront ajustés dans une logique d'optimisation, afin de trouver le meilleur compromis entre niveau de protection et performance globale.

# Chapitre 1

## Présentation de l'organisme d'accueil : Forvis Mazars

Forvis Mazars Group SC est un groupe international intégré spécialisé dans l'audit, l'expertise comptable, la fiscalité, le conseil, ainsi que les services juridiques et comptables, lorsque la législation le permet. Issu de la fusion en 1995 des cabinets Robert Mazars et Guérard Viala, le groupe prend le nom de Mazars en 1999. En 2024, il s'associe au cabinet américain FORVIS pour former un réseau mondial sous la marque unique Forvis Mazars, composé de deux membres : Forvis Mazars, LLP aux États-Unis et Forvis Mazars Group SC à l'international, présent dans plus de 100 pays.

Avec plus de 40 000 professionnels dans le monde, Forvis Mazars se positionne parmi les 10 plus grands cabinets d'audit mondiaux. Il se distingue par son origine française dans un secteur dominé par les géants anglo-saxons, occupant la cinquième place en Europe derrière les «Big Four». Son siège, initialement situé à Paris, a été transféré en 2006 dans la tour Exaltis à La Défense, où travaillent environ 2400 collaborateurs.

Forvis Mazars est présent au Maroc depuis plus de quarante ans, avec une expertise reconnue dans les domaines de l'audit, de la fiscalité, du conseil, de l'outsourcing et des services associés. L'équipe locale est composée de plus de 200 collaborateurs, encadrés par seize Associés aux compétences spécialisées. L'ensemble des professionnels applique des méthodologies harmonisées afin d'assurer une qualité constante des prestations.

Le cabinet accompagne aussi bien les entreprises implantées au Maroc que celles ayant des ambitions de développement international, notamment en Afrique. Il propose une large gamme de services à forte valeur ajoutée répartis selon plusieurs lignes métiers :

- **Accompagnement en Afrique** : développement commercial, stratégies d'internationalisation, structuration financière, soutien à l'export, études de marché, conseil à l'investissement, accompagnement à l'installation, coaching interculturel, veille stratégique.
- **Actuariat** : modélisation actuarielle, évaluation des engagements, gestion des risques, valorisation financière, retraite et avantages sociaux, analyse statistique.
- **Audit** : audit légal, audits contractuels et de projets, audit des marchés publics, audit informatique, investigations (forensic).
- **Consulting** : accompagnement des politiques publiques, stratégie, gouvernance, organisation, gestion des risques, contrôle interne, projets IT (AMOA), normes IFRS, réglementations Bâle II/III.
- **Financial Advisory** : due diligence, évaluation d'entreprise, fusions-acquisitions, restructuration, conseil juridique lié aux transactions.
- **Fiscalité** : fiscalité des entreprises et patrimoniale, mobilité internationale, contentieux fiscal, fiscalité indirecte et immobilière, opérations de restructuration.
- **Legal** : droit des affaires, contrats, droit social, conformité, résolution des litiges, transmission d'entreprise.
- **Outsourcing** : comptabilité, consolidation, reporting, externalisation de processus (BPO), paie, administration RH, trésorerie, centres de services partagés.
- **Digital & Technology** : audit et conseil IT, cybersécurité, transformation numérique, data analytics, automatisation des processus (RPA).
- **Sustainability** : stratégie RSE/ESG, conformité réglementaire (BAM, AMMC, CSRD...), finance durable, risques climatiques, taxonomie européenne, due diligence ESG.

## Chapitre 2

# Solvabilité basée sur les risques (SBR)

La norme Solvabilité Basé sur le Risque (SBR) constitue une réforme majeure du cadre prudentiel applicable aux entreprises d'assurance. Inspiré des principes de Solvabilité II adoptés en Europe, la SBR vise à instaurer un dispositif plus cohérent, fondé sur une évaluation économique des risques et une meilleure correspondance entre le profil de risque des assureurs et le niveau de capital exigé.

Ce régime repose sur trois piliers essentiels :

- **Pilier 1** : Exigences quantitatives, incluant notamment le Capital de Solvabilité Requis (SCR), calculé selon une approche modulaire couvrant les risques de marché, de souscription, de contrepartie et opérationnels, ainsi que les fonds propres supplémentaires et les provisions techniques, à savoir le best estimate et le risk margin.
- **Pilier 2** : Exigences qualitatives, relatives au système de gouvernance, à la gestion des risques.
- **Pilier 3** : Exigences relatives à la transparence à travers la communication des informations financières et prudentielles.

L'objectif principal de la norme SBR est de renforcer la résilience financière du secteur de l'assurance face aux chocs potentiels, tout en favorisant une gestion proactive et prospective des risques. Dans ce cadre, le SCR joue un rôle central, en traduisant quantitativement l'exposition globale de l'entreprise aux différents types de risques, sur un horizon de temps donné, avec un niveau de confiance élevé.

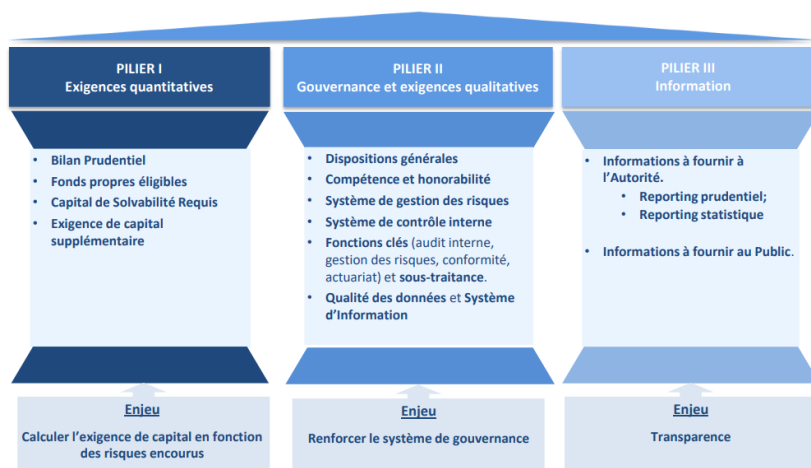


FIGURE 2.1 – Les trois piliers de la réforme SBR

## 2.1 Pilier 1

Le pilier 1 de la norme SBR définit les exigences quantitatives en définissant les méthodes de valorisation des actifs et des passifs, ainsi que les niveaux de capital requis pour couvrir les risques encourus par l'assureur.

Ce pilier établit les bases pour le calcul des provisions techniques et des exigences de capital réglementaire, notamment le **Capital de solvabilité Requis (SCR)** et le **Minimum de Solvabilité Requis (MCR)**. Ces exigences visent à garantir que l'entreprise dispose de fonds propres suffisants pour absorber les pertes significatives futures et continuer à honorer ses engagements même dans des scénarios défavorables.

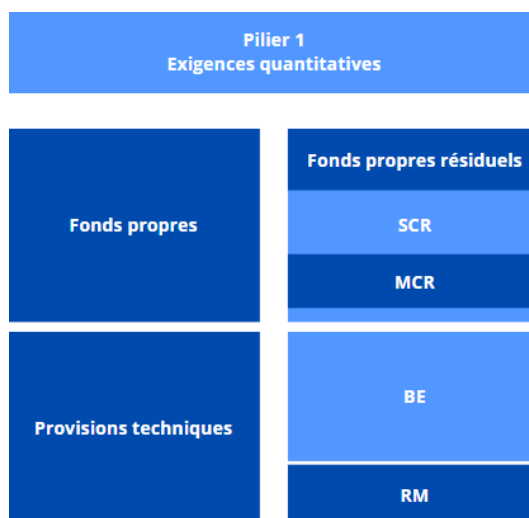


FIGURE 2.2 – Le pilier 1 de SBR

### 2.1.1 Fonds propres

Les fonds propres d'une entreprise d'assurance représentent les ressources financières dont elle dispose pour absorber les pertes éventuelles et garantir sa solvabilité.

Ces fonds propres se composent principalement de deux éléments :

- Le Capital de Solvabilité Requis (SCR), qui correspond au niveau de capital nécessaire pour couvrir les risques majeurs auxquels l'entreprise est exposée (marché, souscription, opérationnel, etc.)
- Les fonds propres résiduels, qui correspondent à la partie des fonds propres au-delà du SCR, servant de marge supplémentaire de sécurité.

Pour assurer la stabilité financière et la protection des assurés, la réglementation impose que les fonds propres de l'entreprise doivent être supérieurs ou égaux au SCR. Cela signifie que l'assureur doit toujours disposer d'un capital suffisant pour faire face aux risques identifiés.

Par ailleurs, il existe une exigence minimale appelée Minimum Capital Requirement (MCR), correspondant au seuil en dessous duquel l'autorité de contrôle considère que la solvabilité de l'assureur est compromise.

Si les fonds propres tombent en dessous du MCR, l'autorité de contrôle intervient immédiatement, notamment en limitant ou en suspendant le droit d'exercer de l'entreprise, afin de protéger les assurés et garantir la stabilité du marché.

Ainsi, le maintien des fonds propres au-dessus du SCR et du MCR est une condition indispensable pour l'exercice légal et pérenne de l'activité d'assurance.

#### 2.1.1.1 Capital de Solvabilité Requis (SCR)

Le Capital de Solvabilité Requis (SCR) représente le niveau de fonds propres que l'entreprise d'assurance doit détenir pour couvrir l'ensemble des risques significatifs auxquels elle est exposée. Il vise à assurer que la compagnie dispose d'une marge de sécurité suffisante pour honorer ses engagements vis-à-vis des assurés, même en cas de chocs défavorables. Le SCR constitue ainsi un indicateur fondamental de la robustesse financière de l'assureur et de sa capacité à résister à des événements extrêmes, tout en maintenant la continuité de ses activités.

Sur le plan technique, le SCR de base correspond à l'agrégation des exigences de capital relatives aux différents modules de risque : risque de marché, risque de concentration, risque de contrepartie, risque de souscription vie et risque de souscription non-vie. Cette agrégation prend en compte les corrélations entre les modules, selon les paramètres définis dans le cadre prudentiel SBR.

À ce SCR de base s'ajoute le SCR opérationnel, qui vise à couvrir les pertes potentielles liées aux défaillances des processus, des systèmes ou des personnes. La somme du SCR de base et du SCR opérationnel constitue alors le SCR total.

Enfin, après prise en compte des ajustements éventuels (notamment les mesures transitoires ou les ajustements liés à la qualité des fonds propres), on obtient le SCR ajusté, utilisé pour évaluer le respect des exigences réglementaires en matière de solvabilité.

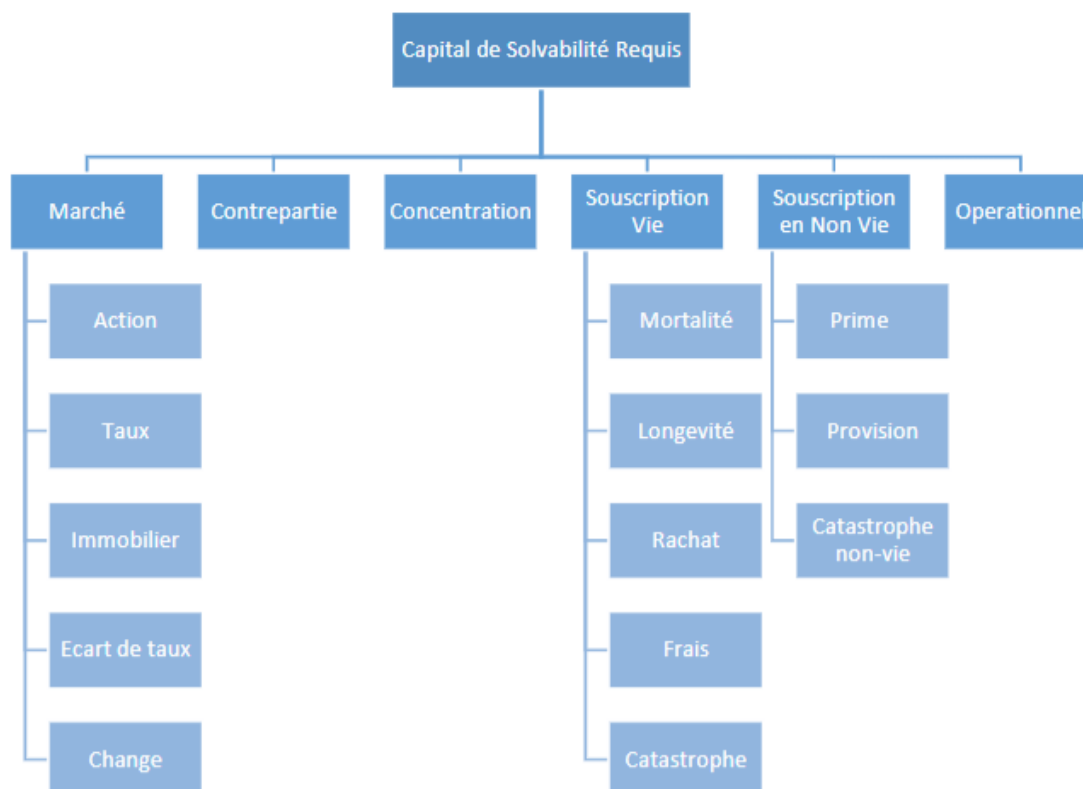


FIGURE 2.3 – Les composantes du SCR

### 1. SCR relatif au risque de marché

Le risque de marché correspond aux pertes potentielles résultant de fluctuations défavorables des marchés financiers. Il peut provenir de la variation des taux d'intérêt, des cours des actions, des devises ou d'autres instruments financiers.

Ainsi, le SCR relatif au risque de marché est calculé comme la somme agrégée des exigences de capital associées aux sous-risques actions, taux, immobilier, spread (écart de taux) et change, en tenant compte de leurs corrélations.

- **Le SCR relatif au risque action** correspond à la perte de fonds propres résultant des baisses simultanées des valeurs des actions.
- **Le SCR relatif au risque de taux** correspond à la perte maximale de fonds propres résultant de l'application des coefficients à la hausse ou à la baisse, fixés par

l'autorité.

- **Le SCR relatif au risque immobilier** correspond à la perte de fonds propres résultant d'une chute de la valeur des actifs immobiliers.
- **Le SCR relatif au risque d'écart de taux** correspond à la perte de fonds propres résultant de l'application des taux de baisse de la valeur des titres de créances, tels qu'ils sont définis par l'autorité.
- **Le SCR relatif au risque de change** correspond à la somme des exigences de capitaux pour risque de change pour chaque devise étrangère.

## 2. SCR relatif au risque de contrepartie

Le SCR relatif au risque de contrepartie correspond à la somme agrégée des exigences de capitaux relatives aux sous-risques de contrepartie de type 1 et de type 2 et ce, après application des coefficients de corrélations définis par l'autorité.

## 3. SCR relatif au risque de concentration

Le SCR relatif au risque de concentration correspond à la perte des fonds propres résultant de la baisse des actifs associés aux ensemble d'émetteurs appartenant aux mêmes groupes. Il est égal à la racine carrée de la somme des carrés des exigences de capitaux relatives au sous-risque de concentration relatifs aux différents groupes d'émetteurs.

## 4. SCR relatif au risque de souscription vie

Le risque de souscription correspond à la perte financière que l'assureur peut subir en raison d'hypothèses inadéquates ou incertaines sur la mortalité, la longévité, le rachat, ou d'autres paramètres utilisés pour la tarification, la sélection des risques ou le calcul des provisions. Ce risque peut résulter d'une mauvaise anticipation des flux futurs liés aux engagements d'assurance vie.

Ainsi, le SCR relatif au risque de souscription vie est déterminé en agréant les exigences de capitaux associées aux sous-risques de mortalité, de longévité, de rachat, de frais, et de catastrophe et ce, compte tenu de leurs corrélations.

- **Le SCR relatif au risque de mortalité** correspond à la perte de fonds propres résultant d'une hausse des taux de mortalité retenus pour le calcul des provisions techniques prudentielles.

Seuls les contrats d'assurance pour lesquels une hausse des taux de mortalité entraîne une augmentation des provisions techniques prudentielles sont concernés par la constitution de ce SCR.

- **Le SCR relatif au risque de longévité** correspond à la perte de fonds propres due à une baisse des taux de mortalité retenus pour le calcul des provisions techniques prudentielles.

Seuls les contrats d'assurance pour lesquels une baisse des taux de mortalité entraîne une augmentation des provisions techniques prudentielles sont concernés par la constitution de ce SCR.

- **Le SCR relatif au risque de rachat** correspond à le plus élevé des deux SCRs : le SCR relatif à un rachat haussier et le SCR relatif à un rachat baissier, avec :
  - Le SCR pour risque de hausse des taux de rachat correspond à la perte de fonds propres résultant d'une revalorisation des provisions techniques prudentielles suite à une hausse de des taux de rachat retenus en nombre et en montant.
  - Le SCR pour risque de baisse des taux de rachat correspond à la perte de fonds propres résultant d'une revalorisation des provisions techniques prudentielles suite à une baisse de des taux de rachat retenus en nombre et en montant.
- **Le SCR relatif au risque de frais** correspond à la perte de fonds propres résultants d'une augmentation des frais, à savoir, les frais de gestion.
- **Le SCR relatif au risque de catastrophe vie** correspond à la perte résultant de l'application d'un choc aux montants des capitaux sous risques relatifs aux garanties en cas de décès nets de réassurance.

#### 5. SCR relatif au risque de souscription non-vie

Le risque de souscription non-vie désigne le risque de perte ou de changement défavorable de la situation financière d'une entreprise d'assurance, résultant d'hypothèses inadéquates en matière de tarification, de provisionnement ou de gestion des sinistres pour les contrats d'assurance non-vie.

Ainsi, le SCR relatif au risque de souscription non-vie est déterminé en agrégeant les exigences de capitaux (SCRs) relatives aux sous-risques de primes, de provisions et de catastrophe non-vie tout en prenant en compte leurs corrélations.

- **Le SCR relatif au risque de prime**

Le SCR relatif au risque de prime correspond à la somme agrégée des exigences de capital calculées pour chaque sous-catégorie, en tenant compte des corrélations entre elles.

Pour chaque sous-catégorie, cette exigence est déterminée en multipliant un facteur déterminé par l'écart-type des primes par le montant des primes acquises, majoré de la provision pour primes non acquises, le tout net de réassurance à la date d'inventaire.

- **Le SCR relatif au risque de provision**

Le SCR relatif au sous-risque de provisions est obtenue en agrégeant les exigences de capital propres à chaque sous-catégorie, en tenant compte des corrélations entre elles.

Pour chaque sous-catégorie, cette exigence est calculée en multipliant un coefficient spécifique par le produit de l'écart-type des provisions et du montant de la meilleure estimation des engagements pour sinistres, nette de réassurance.

- **Le SCR relatif au risque de catastrophe non-vie**

Le SCR relatif au risque de catastrophe non-vie est obtenu en appliquant la racine carrée à la somme des carrés des SCRs relatifs au sous-risque de catastrophe non-vie des garanties suivantes :

- Individuelles accidents et Invalidité ;
- Maladie ;
- Accidents du travail et maladies professionnelles ;
- Responsabilité civile automobile des véhicules terrestres à moteur ;
- Responsabilité civile (autre que la responsabilité civile automobile et la responsabilité civile résultant de l'emploi de véhicules fluviaux ou maritimes ou de l'emploi des aéronefs) ;
- Incendie ;
- Maritime corps, facultés et responsabilité civile résultant de l'emploi de véhicules fluviaux et maritimes ;
- Aviation corps et responsabilité civile résultant de l'emploi des aéronefs ;
- Marchandises transportées par voie terrestre ;
- Assurance récolte, grêle ou gelée et éléments naturels ;
- Crédit et caution ;

## 6. SCR relatif au risque opérationnel

Le SCR relatif au risque opérationnel correspond à la perte résultant de procédures internes, de membres du personnel ou de systèmes inadéquats ou défaillants, ou d'événements extérieurs.

### 2.1.1.2 Minimum de solvabilité requis (MCR)

Comme déjà mentionné, le Minimum de Solvabilité Requis (MCR) représente le niveau plancher de fonds propres que l'entreprise d'assurance doit impérativement détenir pour pouvoir continuer légalement à exercer ses activités. Il constitue un seuil critique en dessous duquel la situation financière de l'entreprise est jugée inacceptable du point de vue réglementaire.

Si les fonds propres éligibles tombent en dessous du MCR, l'Autorité est tenue d'intervenir rapidement. Cette intervention peut prendre la forme d'une injonction, d'un plan de redressement, voire d'une suspension du droit d'exercice, dans le but de protéger les assurés et de préserver la stabilité du secteur.

Le MCR est calculé selon une formule standard prenant en compte des éléments tels que le volume des primes souscrites, les provisions techniques, et la nature des risques assurés. Il s'agit d'un indicateur de sécurité minimale, plus simple et plus prudent que le SCR, qui sert de référence en cas de dégradation rapide de la solvabilité.

## 2.1.2 Provisions techniques

Les provisions techniques constituent le cœur du bilan prudentiel des assureurs. Leur évaluation doit être à la fois rigoureuse et prudente, car elle conditionne directement l'appréciation de la solvabilité de la compagnie. En effet, ces provisions représentent les engagements de l'assureur à l'égard des assurés, et leur montant influe inversement sur le niveau des fonds propres, déterminés comme la différence entre la valeur des actifs et celle des engagements techniques.

Lorsque les fonds propres ainsi calculés s'avèrent insuffisants pour couvrir le capital réglementaire requis (SCR), certaines entreprises peuvent être tentées d'adopter une approche optimiste. Cela peut se traduire par une sous-estimation des provisions techniques ou une valorisation avantageuse des actifs, dans le but de compenser la baisse des fonds propres et de maintenir un ratio de solvabilité conforme aux exigences prudentielles.

Sous SBR, les provisions techniques sont constituées et somme de deux éléments :

### 2.1.2.1 Le Best Estimate (BE)

- **Le Best Estimate (BE)** correspond à la valeur actuelle nette probable des flux futurs (prestations, frais, commissions, primes). Le calcul du Best Estimate doit inclure les flux futurs associés uniquement aux contrats existants à la date d'évaluation. Il est donné en cas de vie par la formule suivante :

$$BE = BEGP + BDF$$

avec :

- **BEGP** représente la meilleure estimation des engagements garantis futurs probabilisés

Mathématiquement, le BEGP peut être formulé comme suit :

$$BEGP = \sum_{t=1}^{\infty} \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[ \frac{CF_{\text{out}}^{(t)} - CF_{\text{in}}^{(t)}}{\prod_{s \leq t} (1 + r_s)} \right] \quad (2.1)$$

Où :

- $\mathbb{Q}$  représente la probabilité risque-neutre,
- $CF_{\text{out}}^{(t)}$  et  $CF_{\text{in}}^{(t)}$  sont respectivement les flux de trésorerie sortants et entrants à la date  $t$ ,
- $r_s$  est le taux d'actualisation des flux, c'est le taux sans risque forward à la date  $t$ .

Dans le cadre d'une modélisation fondée sur des scénarios et en recourant à la méthode de Monte Carlo, le Best Estimate (BE) peut être formulé comme suit :

$$\text{BE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T \text{flux}_j^{(i)} \times \delta_j^{(i)}$$

où :

- $N$  désigne le nombre de scénarios économiques simulés,
- $T$  représente l'horizon de projection,
- $\text{flux}_j^{(i)}$  correspond au flux de trésorerie à l'année  $j$  dans le scénario  $i$ ,
- $\delta_j^{(i)}$  est le déflateur associé à l'année  $j$  et au scénario  $i$ .

Dans le cadre de notre projet, nous avons adopté des taux déterministes pour modéliser le rachat et la mortalité, ainsi qu'un scénario central pour l'évolution des actifs. De ce fait, le Best Estimate est évalué de manière déterministe.

Le Best Estimate garantie probable (BEGP) dans notre étude peut être formulé comme suit :

$$\text{BEGP} = \sum_{t=1}^T \frac{CF_{\text{out}}^{(t)} - CF_{\text{in}}^{(t)}}{(1 + r_t)^t}$$

- **BDF** représente les bénéfices discrétionnaires futurs.

### 2.1.2.2 La Marge de risque (RM)

- **La Marge de risque (RM)** représente le coût lié à l'immobilisation du capital de solvabilité requis pour couvrir les engagements garantis.

Dans le cadre de solvabilité II, elle s'interprète comme une provision complémentaire au Best Estimate, de manière à ce que le montant total de provisions inscrites au bilan corresponde à celui qu'exigerait une entité de référence pour honorer les engagements à la charge de l'assureur.

La RM est évaluée en actualisant le coût du capital annuel généré par l'immobilisation

du SCR, et ce selon la formule suivante.

$$RM = \alpha \sum \frac{SCR_i}{(1 + r_{i+1})^{i+1}}$$

avec :

- $\alpha$  représente le taux du coût du capital ;
- $SCR_i = \frac{BE_{engagementi}}{BE_{engagement0}} \times SCR_0$ , et représente le SCR à la date  $i$ , compte tenu uniquement des SCRs relatifs aux risques de souscription vie et de souscription non-vie.
- $r_t$  est le taux sans risque en date  $t$ .
- $SCR_0$  représente le SCR à la date d'inventaire compte tenu uniquement des SCRs relatifs aux risques de souscription vie et de souscription non-vie.

### 2.1.2.3 Courbe de taux pour l'actualisation des flux futurs

Pour actualiser les flux de leurs engagements, les assureurs sont incités à utiliser une courbe de taux sans risque en suivant une démarche bien précise (Bottom-up), en se basant sur les courbes de taux actuariels des bons du Trésor publiées par Bank Al-Maghrib.

La démarche adoptée est la suivante :

1. Dans un premier temps, on identifie le dernier point liquide (DPL), puis on interpole linéairement les courbes de taux de référence. Ensuite, on transforme ces courbes, exprimées en taux actuariels, en courbes de taux zéro-coupon, en supposant que la valeur de marché des obligations est égale à leur nominal.
2. Une fois les courbes de taux zéro-coupon construites, on procède à leur extrapolation à l'aide de la méthode de Smith-Wilson. Cette méthode permet d'estimer la fonction de prix  $P(t)$  des obligations zéro-coupon pour toutes les maturités  $t > 0$ . La fonction  $P(t)$  est supposée positive, strictement décroissante avec la maturité, valant 1 pour une maturité nulle ( $t = 0$ ), et tendant vers 0 lorsque la maturité devient très grande ( $t \rightarrow \infty$ ).

#### La fonction de prix de la méthode Smith-Wilson

La fonction de prix  $P(t)$ , définie pour toute maturité  $t > 0$ , est exprimée de la manière suivante :

$$P(t) = e^{-TFU \times t} + \sum_{j=1}^N \varepsilon_j K_j(t)$$

où :

- $t$  représente la maturité,
- $(\varepsilon_j)_{j=1..N}$  sont les coefficients à ajuster à partir des prix observés sur les taux zéro-coupon avant extrapolation.

Cette fonction se compose de deux éléments :

- Un terme  $e^{-TFU \times t}$  représentant le comportement asymptotique du facteur d'actualisation à long terme.

Le  $TFU$  (Taux Forward Ultime) constitue une estimation du taux zéro-coupon à un an pour des maturités lointaines.

- Une combinaison linéaire de  $N$  fonctions noyau  $K_j(t)$  pondérées par les coefficients  $\varepsilon_j$ .

Ces fonctions prennent en compte à la fois la maturité  $t$ , la maturité  $u_j$  associée à chaque obligation observée, le  $TFU$  et le paramètre  $\alpha$ , qui contrôle la vitesse de convergence vers le  $TFU$ .

Pour tout  $j = 1, \dots, N$ , une fonctions noyau  $K_j$  est définie de la manière suivante :

$$K_j(t) = e^{-TFU \times (t+u_j)} \left[ \alpha \cdot \min(t, u_j) - 0.5 \cdot e^{-\alpha \cdot \max(t, u_j)} \cdot (e^{\alpha \cdot \min(t, u_j)} - e^{-\alpha \cdot \min(t, u_j)}) \right]$$

Pour les coefficients  $(\varepsilon_j)_{j=1..N}$ , ils sont déterminés de manière à reproduire exactement les prix observés des obligations zéro-coupon. Pour cela, on résout le système suivant :

$$\begin{cases} m_1 = P(u_1) = e^{-TFU \cdot u_1} + \sum_{j=1}^N \varepsilon_j K_j(u_1) \\ \vdots \\ m_i = P(u_i) = e^{-TFU \cdot u_i} + \sum_{j=1}^N \varepsilon_j K_j(u_i) \\ \vdots \\ m_N = P(u_N) = e^{-TFU \cdot u_N} + \sum_{j=1}^N \varepsilon_j K_j(u_N) \end{cases}$$

où  $m_i$  représente le prix de marché observé pour la maturité  $u_i$ .

Ce système linéaire peut être retranscrit sous forme matricielle, ce qui permet de résoudre les  $\varepsilon_j$  par inversion matricielle. Une fois ces coefficients obtenus, on peut les injecter dans la fonction de prix  $P(t)$  pour calculer la valeur d'un zéro-coupon au-delà de la dernière maturité disponible.

Les taux zéro-coupon extrapolés  $R_t$  pour  $t > u_N$  sont ensuite déduits à l'aide de la relation suivante :

$$R_t = \left( \frac{1}{P(t)} \right)^{1/t} - 1$$

Cependant, les paramètres  $TFU$  et  $\alpha$  doivent être estimés en amont.

Pour ce faire, on procède comme suit :

Le paramètre **TFU** est estimé comme étant la somme des deux quantités suivantes :

- La moyenne des taux d'intérêt réels à échéance d'un an. Cette moyenne est calculée comme la différence entre les taux zéro-coupon 1 an observés au 31/12 de chaque année et l'inflation annuelle correspondante, sur la période disponible.
- Le taux d'inflation cible, calibré sur l'historique disponible, selon une moyenne pondérée :

$$\text{Taux d'inflation cible} = \exp \left( \frac{\sum_{i=0}^n w_i \cdot \ln(1 + \text{Taux\_inflation}_i)}{\sum_{i=0}^n w_i} \right) - 1$$

où  $n$  est le nombre d'années d'historique d'inflation disponible, et  $w_i$  désigne le poids associé au  $i^{\text{ème}}$  taux d'inflation, défini par :

$$w_i = \beta^{n-i}, \quad \text{avec } \beta = 0,99$$

Le paramètre  $\alpha$  (la vitesse de convergence) quant à lui est obtenu de manière à ce que la différence entre les taux forward 1 an projetés et le TFU converge vers 0,0001 à horizon  $T$  ans.

Une fois la courbe des taux sans risque déterminée, on y ajoute la prime de liquidité.

## 2.2 Pilier 2

Le Pilier 2 de SBR vise à renforcer la gouvernance et la gestion des risques au sein des compagnies d'assurance. Il impose la mise en place d'un système robuste de gestion des risques, nous nous intéressons, dans ce cadre, à une approche analogue à celle de Solvabilité II, notamment à travers le processus ORSA (Own Risk and Solvency Assessment), qui évalue en continu et de manière prospective les besoins globaux de solvabilité, en tenant compte du profil de risque spécifique de l'entreprise, de ses limites de tolérance au risque et de sa stratégie .

Les objectifs principaux du Pilier 2 sont de s'assurer que la compagnie est bien gérée, capable de calculer et maîtriser ses risques, et qu'elle dispose en permanence d'un niveau de capitalisation adéquat. Cette approche constitue une évolution majeure, en encourageant les compagnies à adopter une démarche de gestion des risques d'entreprise (ERM), leur permettant d'apprécier

et de mesurer elles-mêmes leurs risques. Le non-respect des exigences de ce pilier peut conduire à l'ajout par l'autorité de contrôle d'un capital à détenir le capital add-on.

Le Pilier 2 apporte également des dispositions sur la gouvernance, la surveillance des risques, le contrôle interne et l'audit interne. Il vise à impliquer les différents organes de l'entreprise dans le processus de gestion des risques interne, notamment à travers l'ORSA. L'objectif est de permettre un pilotage stratégique en fonction du profil de risque de l'assureur, en alignant la stratégie de l'entreprise avec ses capacités de solvabilité .

### 2.2.1 Gouvernance

Les organismes d'assurance doivent instaurer un système de gouvernance rigoureux afin d'assurer une gestion prudente et saine de leurs activités. Cette gouvernance repose sur une structure organisationnelle transparente, caractérisée par une répartition explicite et une séparation adéquate des responsabilités. Elle implique également la mise en place de politiques écrites, soumises à l'approbation du Conseil d'Administration ou du Conseil de Surveillance. Par ailleurs, ce cadre doit être adapté à la taille, à la nature et à la complexité de l'organisme.

La gouvernance joue un rôle central dans la gestion des risques au sein de l'entreprise. Elle est la première impliquée dans ce processus et demeure responsable en cas de non-application des mesures prévues ou de difficultés financières. Son rôle englobe notamment la répartition claire des responsabilités ainsi que la transmission efficace des informations en interne, grâce à des lignes de reporting structurées et une communication fluide, à la fois descendante (Top-Down) et ascendante (Bottom-Up), garantissant ainsi la transparence.

Elle doit également mettre en place un dispositif interne de gestion des risques, intégrant des stratégies et des processus permettant d'identifier, de mesurer et de maîtriser les risques.

Il revient à l'organe d'administration, de gestion ou de contrôle de l'entreprise d'assurance ou de réassurance (Conseil d'administration, dirigeants) d'assumer la responsabilité finale du respect des obligations légales, réglementaires et administratives qui lui sont applicables. Cette responsabilité confère à cette instance un rôle central dans la conduite et le contrôle de l'activité, en veillant à ce que l'entreprise évolue dans un cadre conforme et maîtrisé.

En exerçant ainsi un ensemble de missions essentielles, elle participe à la solidité, à la transparence et à la pérennité de la gouvernance de l'entreprise.

- Approuver les politiques écrites en matière de gestion des risques, de contrôle interne et d'audit interne.
- Définir et valider l'appétence aux risques.

- S’assurer de la pertinence du système de gestion des risques.
- Valider l’identification et l’évaluation des risques.
- Fournir une vision globale des risques de l’entreprise, en adoptant une approche Top-Down.

### 2.2.2 ORSA : Own Risk and Solvency Assessment

L’ORSA (Own Risk and Solvency Assessment ou Évaluation interne des risques et de la solvabilité), est un processus clé d’aide à la décision et à la stratégie. Il permet aux entreprises d’assurance et de réassurance d’analyser, de manière continue et prospective, leur exposition aux risques, leur capacité à les maîtriser et à absorber d’éventuelles fluctuations.

Selon la Directive l’ORSA comprend trois composantes qu’il convient de traiter de manière spécifique, de documenter et d’évaluer tant au niveau qualitatif que quantitatif. Ces trois composantes concernent :

- **L’évaluation du besoin global de solvabilité (BGS)** compte tenu du profil de risque spécifique, des limites approuvées de tolérance au risque et de la stratégie commerciale de l’entreprise, cela comprend, en plus du besoin de fonds propres et de la politique de financement et de gestion prévisionnelle de ces fonds, d’autres moyens essentiels à la maîtrise de sa solvabilité, cela inclut la surveillance des risques, une gouvernance efficace, des moyens humains et techniques adaptés, ainsi que des procédures d’alerte et d’urgence. Il permet également d’anticiper les ajustements en matière de réassurance et d’assurer la continuité d’activité.
- **Le respect permanent des exigences de capital et des exigences concernant les provisions techniques** : la mise en œuvre d’un processus de surveillance de la couverture des exigences réglementaires de capital (MCR/SCR) et d’évaluation des provisions techniques compte tenu des évolutions possibles des différents facteurs de risque, des risques sur l’évaluation des provisions techniques, et du développement prévu sur tout l’horizon du plan stratégique.
- **L’analyse du caractère adapté des risques aux modèles d’évaluation et hypothèses du pilier 1** : Il s’agit d’évaluer l’écart entre le profil de risque de l’entreprise et les hypothèses sous-jacentes au calcul du capital de solvabilité requis (SCR). L’évaluation doit s’assurer que tous les risques quantifiables et importants sont inclus dans le calcul du SCR, que la calibration de ces risques est conforme au profil de risque de l’organisme et que l’interdépendance entre les risques est correctement modélisée. Cette évaluation doit être au minimum qualitative et, si l’écart est jugé significatif, quantitative.

Les trois principes fondamentaux de l'ORSA reposent sur des éléments quantitatifs, tels que le profil de risque, et qualitatifs, comme la stratégie de gestion des risques. Par ailleurs, le respect continu des exigences de capital nécessite un suivi régulier de l'activité, en veillant à l'adéquation du bilan de l'entreprise avec son business plan. Concrètement, l'ORSA s'articule autour de trois étapes principales :

- Définition du profil de risque
- Élaboration de la stratégie de gestion des risques
- Mise en place d'un processus de suivi de l'activité

### 2.2.2.1 Le profil de risque

**Cartographie des risques** Dans le cadre de l'ORSA, la cartographie des risques vise à identifier et recenser l'ensemble des risques significatifs auxquels l'entreprise est confrontée dans l'exercice de son activité.

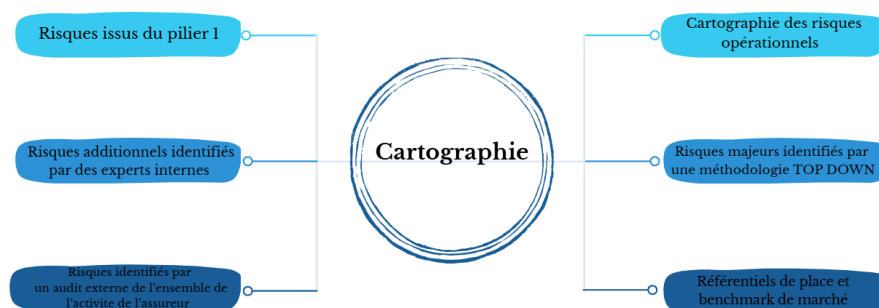
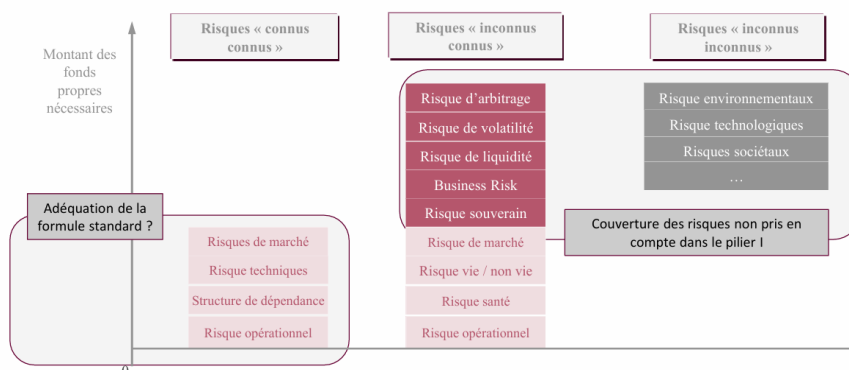


FIGURE 2.4 – Cartographie exhaustive des risques

Ces risques peuvent être récapitulés comme suit :



**L'appétence aux risques :** L'appétence aux risques est le niveau de risque agrégé qu'une entreprise accepte de prendre en vue de la poursuite de son activité et de son développement. Cette limite globale est à priori déterminée par les instances de gouvernance de l'entreprise et s'exprime sous la forme de mesures de risque et de limite. le suivi de l'appétence aux risques fait

parfois appel à des indicateurs de risques de différentes natures : Key Performance Indicators (KPI) qui sont reliés aux objectifs stratégiques, les Key Risk Indicators (KRI) qui sont reliés à la dimension risque et les Key Control Indicators (KCI), utilisés pour le suivi de taux de rendement en analyse financière.

### Indicateurs de performance

- Résultat minimal attendu sur l'ensemble des activités.
- Résultat minimal attendu sur les affaires nouvelles.
- Objectif minimal de rentabilité des fonds propres (ROE).
- Seuil maximal du ratio combiné.
- Limite supérieure fixée pour la variance du résultat...

### Indicateurs de solvabilité

- Niveau minimal requis du ratio de solvabilité.
- Ratio de solvabilité attendu après application d'un scénario de stress.
- Maintien d'un niveau de solvabilité minimal avec une probabilité définie...

**Choix et définition des métriques** L'appétence au risque est mesurée à l'aide d'une métrique. Celle-ci comporte 5 composantes :

- **La dimension** : Correspond aux indicateurs que la gouvernance de l'entreprise choisit de suivre.
- **Niveau de probabilité du risque** : On peut donner à ce paramètre, suivant la mesure de risque utilisée (un niveau de VaR, de TVaR, de MCEV, de VIF, de probabilité de la ruine...), une interprétation économique.
- **L'horizon temporel** : Le Pilier 1 impose un horizon d'un an pour l'évaluation des exigences de solvabilité. L'ORSA exige une approche plus prospective des risques. L'ACPR recommande un horizon au moins égal à celui du plan stratégique
- **Le niveau de sécurité** : Correspond à la valeur numérique qui fixe les seuils d'alerte et tolérance sur les différents indicateurs choisis (ex : VaR à 99,5%, Résultat net supérieur à 0)
- **La méthode d'agrégation** : Il peut s'agir d'une somme simple, d'une somme pondérée, d'une matrice de corrélation, ou de toute autre forme agrégée selon la nature des indicateurs considérés

#### 2.2.2.2 La stratégie de gestion des risques

Une fois l'appétence au risque définie, l'entreprise peut élaborer sa stratégie de gestion des risques. Celle-ci repose sur quatre approches principales :

- **L'acceptation** : le risque est intégré dans la politique de gestion des risques.
- **L'évitement** : l'assureur renonce aux risques jugés excessifs ou insuffisamment maîtrisés.
- **La réduction du risque** : mise en place de mesures de prévention et de protection.
- **Le transfert du risque** : délégation d'une partie des risques de marché via des mécanismes tels que la réassurance ou la titrisation.

Afin de couvrir le besoin global de solvabilité, l'entreprise doit anticiper les ressources nécessaires, qui peuvent prendre plusieurs formes :

- Des ressources financières adaptées.
- Des stratégies de transfert de risques, telles que la couverture ou la réassurance.
- Des mesures de gestion spécifiques à activer en cas de scénarios défavorables.

La stratégie de gestion des risques vise principalement à décliner l'appétence au risque afin d'optimiser le pilotage de l'entreprise. Elle implique une coordination étroite entre les différentes parties prenantes, notamment la direction des risques, le top management et les directions opérationnelles.

### 2.2.2.3 Le processus de suivi de l'activité

La troisième phase essentielle du processus ORSA concerne le suivi continu de l'activité, notamment en garantissant le respect permanent des exigences en capital et des provisions techniques.

L'ORSA doit inclure un ensemble de processus permettant d'identifier les événements nécessitant sa mise à jour. En effet, toute modification significative de la situation de l'entreprise impose une réévaluation de l'ORSA afin de mieux appréhender les expositions aux risques et d'adapter les mécanismes de gestion.

Parmi les événements pouvant déclencher une réévaluation de l'ORSA, on peut citer :

- **Évolution du périmètre de calcul** : intégration de nouveaux risques, opérations de cession, fusion ou acquisition.
- **Modification des facteurs de risque** : survenance d'un sinistre majeur, fluctuations des marchés financiers, dégradation du rating d'une contrepartie clé.
- **Changements dans l'environnement économique et réglementaire.**

Enfin, l'ORSA doit également évaluer le profil de risque avant et après la mise en œuvre de décisions stratégiques telles que le lancement d'un nouveau produit, la conclusion d'un partenariat commercial ou la souscription d'un programme de réassurance.

## 2.3 Pilier 3

Le troisième pilier de la norme SBR vise à encourager les compagnies d'assurance et de réassurance à transmettre l'information financière non seulement aux autorités de contrôle, mais aussi au public dans toutes ses composantes : assurés, actionnaires et professionnels du secteur.

Pour répondre à cet objectif, ce pilier met l'accent sur quatre points essentiels :

**1. La transparence :**

Les informations publiées doivent permettre d'avoir une idée claire sur la situation financière de la compagnie et son niveau de solvabilité.

**2. La cohérence :**

Les données communiquées doivent être compréhensibles et alignées avec les informations transmises aux différents acteurs concernés.

**3. L'homogénéité :**

Les mêmes formats de reporting sont exigés pour toutes les compagnies d'assurance, afin d'assurer une comparaison fiable.

**4. La traçabilité :**

Les compagnies doivent être en mesure de justifier et retracer toutes les informations publiées, pour garantir leur fiabilité.

# Chapitre 3

## Réassurance

### 3.1 Généralités

#### 3.1.1 Histoire

La réassurance trouve ses origines au XIV<sup>e</sup> siècle. En juillet 1370, deux assureurs vénitiens ont assuré la cargaison d'un navire reliant Gênes à L'Écluse, aux Pays-Bas. Ils ont choisi de céder le risque le plus périlleux du trajet, entre le détroit de Gibraltar et le golfe de Gascogne, à un troisième assureur. Cette pratique s'est principalement développée dans le commerce maritime méditerranéen, avec des contrats similaires retrouvés en Italie, en France et au Royaume-Uni, bien que limités à des cessions spécifiques dans ce domaine.

La réassurance moderne à grande échelle est apparue en Allemagne vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, stimulée par la révolution industrielle. Face à la difficulté croissante des compagnies d'assurance allemandes à couvrir les vastes complexes industriels, notamment contre les incendies, la nécessité de la réassurance s'est imposée. En réponse, la Kölnische Rück a été fondée en 1846 pour fournir la capacité requise par le secteur industriel en pleine expansion.

En août 1992, l'ouragan Andrew a sévèrement frappé la Floride, mettant en évidence un besoin accru de protection en réassurance contre les catastrophes naturelles aux États-Unis. Cela a conduit à l'émergence de nouveaux réassureurs aux Bermudes. Dès les années 1970, ce marché était déjà reconnu pour ses captives d'assurance à vocation industrielle et fiscale. Dans les années 1980, il a également servi de source de réassurance pour faire face à la crise de la responsabilité civile aux États-Unis. À partir de 1993, le marché bermudien a fourni aux compagnies américaines des capacités en réassurance contre les dommages catastrophiques. Par la suite, ces réassureurs ont étendu leurs activités au Japon, en Asie et en Europe. De nos jours, beaucoup

de ces sociétés sont multi-branches et disposent de bureaux ou de filiales en Europe, en Asie et en Afrique.

Au Maroc, la réassurance a pris son essor avec la création de la Société Centrale de Réassurance (SCR) en 1960. Fondée par l'État marocain et la Caisse de dépôt et de gestion (CDG), la SCR est devenue le principal réassureur du pays, couvrant divers risques, y compris les branches IARD, la vie, l'aviation et le maritime.

### 3.1.2 Définition

Le contrat de réassurance est un accord par lequel le réassureur s'engage, pour une durée déterminée et en contrepartie d'une prime de réassurance, à garantir financièrement l'assureur cédant. Cette couverture porte sur tout ou partie des sinistres liés à certaines ou l'ensemble des polices constituant le portefeuille de l'assureur, conformément aux termes et conditions définis dans le contrat.

On distingue plusieurs niveaux dans la chaîne de gestion des risques :

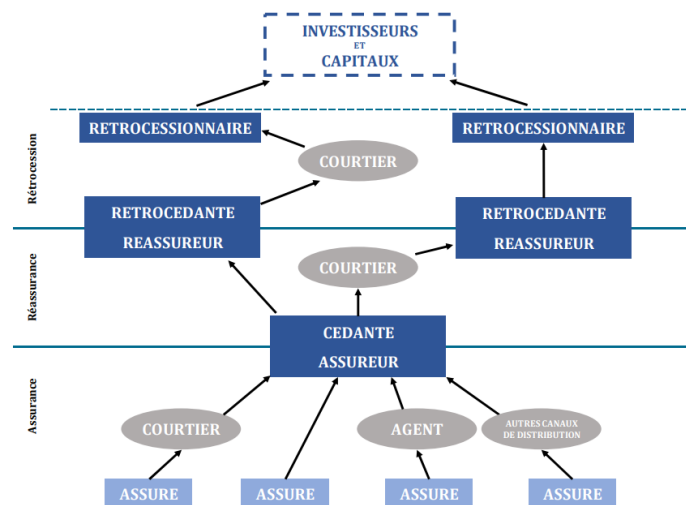


FIGURE 3.1 – Les niveaux d'assurance et de réassurance

- **La relation assuré-assureur** : L'assuré souscrit un ou plusieurs contrats d'assurance, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un courtier, d'un agent ou d'un autre canal de distribution, auprès d'un ou plusieurs assureurs. Dans le cas de risques majeurs, la coassurance (où plusieurs assureurs partagent un même contrat) est souvent utilisée.
- **La relation cédant cessionnaire** : Le cédant, généralement une société d'assurance, transfère une part des risques souscrits à un ou plusieurs réassureurs, appelés cessionnaires. Chacun prend en charge une portion définie du risque. L'un d'eux, désigné comme apériteur, assure la rédaction du contrat et la coordination des négociations, avec la possibilité d'ajuster certaines conditions. Néanmoins, la responsabilité à l'égard des assurés

reste entièrement portée par l'assureur cédant, qui demeure redevable des engagements en cas de défaillance d'un réassureur.

- **La relation rétrocedant-récessionnaire** : Un réassureur (appelé rétrocedant) peut, à son tour, céder une partie de ses risques à un autre réassureur (récessionnaire). Cette chaîne peut se poursuivre à plusieurs niveaux. Dans certains cas, les risques peuvent être transférés à des investisseurs tiers, comme cela est le cas pour les « CAT BOND » (obligations catastrophes) émises par certains assureurs ou réassureurs.

### Programme de réassurance

Un programme de réassurance désigne l'ensemble des protections mises en place par une compagnie d'assurance pour transférer une partie de ses risques à des réassureurs. Ces protections combinent généralement divers types de réassurance traditionnelle au sein d'un même programme, permettant ainsi à la cédante d'adapter sa couverture en fonction des spécificités de son portefeuille, des types de risques couverts, de leur répartition géographique et des montants assurés.

## 3.1.3 Les formes traditionnelles de Réassurance

### 3.1.3.1 Juridiques

- **Les cessions facultatives** : Les réassurances facultatives représentent le mode de cession le plus ancien. Dans ce cadre, l'assureur propose la cession des risques, police par police, au réassureur de son choix, qui a la liberté d'accepter ou de refuser chaque cession. Ce type de cession concerne généralement des risques spécifiques, souvent exclus des traités de réassurance, ou des risques peu fréquents nécessitant des couvertures élevées. Cela peut inclure des secteurs comme l'aviation, le transport ou encore les grands projets de construction. Cependant, ce mode de cession présente des inconvénients notables. Sa gestion peut s'avérer complexe et fastidieuse, surtout en raison de la nécessité de traiter chaque risque de manière séparée. De plus, cette approche peut entraîner un déséquilibre dans le portefeuille de l'assureur, car chaque risque est cédé individuellement plutôt que de manière groupée.
- **Les cessions facultatives-obligatoires** : Dans ce cas, le réassureur est tenu d'accepter les risques sélectionnés par la cédante, à condition qu'ils remplissent les critères prédéfinis dans le contrat. Cette option intervient généralement lorsque l'assureur souhaite souscrire rapidement à des affaires. En optant pour une cession facultative, l'assureur se trouve face à deux choix possibles :
  - Souscrire d'abord et négocier la couverture avec le réassureur par la suite, ce qui comporte le risque d'être à découvert, car le réassureur peut refuser la cession.

- Demander l'accord préalable des réassureurs avant de souscrire, ce qui présente le risque de perdre un client qui pourrait choisir un concurrent plus rapide pour valider la cession. La réassurance facultative-obligatoire permet de contourner ces difficultés. Elle offre un compromis entre la réassurance facultative et obligatoire, d'où son nom. Le réassureur, n'ayant pas la possibilité de sélectionner les risques, peut être confronté à un problème d'anti-sélection, où la cédante pourrait être tentée de ne céder que ses risques les plus problématiques. Cependant, si la cédante manque de la crédibilité requise, le réassureur peut choisir de ne pas renouveler les accords précédemment conclus.
- **Les cessions obligatoires (ou traités) :** Les réassurances obligatoires, apparues plus tardivement, concernent l'ensemble des risques souscrits par une cédante sur un portefeuille donné. Dans ce cadre, l'assureur est tenu de céder l'ensemble des affaires qui répondent aux critères définis dans le traité de réassurance, et le réassureur est obligé de les accepter. Aucune des deux parties n'a la possibilité de sélectionner les risques, d'où le caractère obligatoire de cette forme de réassurance. Ce système simplifie la gestion de la réassurance, car un seul traité peut couvrir un grand nombre de risques. Cependant, les conditions peuvent être complexes et détaillées. Par exemple, un traité de réassurance en responsabilité civile peut comporter plusieurs dizaines de pages spécifiant les conditions de couverture ainsi que les exclusions de garanties.

### 3.1.3.2 Techniques

**Réassurance proportionnelle** Dans ce type de réassurance, il y a une relation de proportionnalité entre le montant de sinistre couvert par le réassureur et la prime ou le capital assuré. On distingue deux formes de réassurance proportionnelle :

- **Quote-Part (Quota Share)**

Le traité de réassurance en quote-part se caractérise par une répartition proportionnelle des primes et des sinistres entre l'assureur et le réassureur. Son principal atout est sa simplicité de gestion, mais il n'offre aucune protection contre l'accumulation de sinistres liés à un même événement. L'assureur cède un pourcentage fixe de ses primes, tandis que le réassureur assume la même part des sinistres, sous réserve de commissions reversées à la cédante, qui supporte seule les frais de souscription et de gestion. Ce mécanisme, bien que standardisé, ne convient pas à toutes les sinistralités. En revanche, il améliore la marge de solvabilité et accroît la capacité de souscription, notamment pour les assureurs s'engageant dans de nouveaux domaines. Toutefois, il ne modifie pas la structure du portefeuille, maintenant son exposition aux risques initiaux.

Mathématiquement, en désignant par  $n$  le nombre de contrats (ie de police), et  $a$  le taux

de rétention :

Primes :

$$\text{Risque total : } P = \sum_{i=1}^n P_i$$

$$\text{Risque conservé : } aP = a \times \sum_{i=1}^n P_i$$

$$\text{Risque cédé : } (1 - a)P = (1 - a) \times \sum_{i=1}^n P_i$$

Sinistres :

$$\text{Risque total : } S = \sum_{i=1}^n S_i$$

$$\text{Risque conservé : } aS = a \times \sum_{i=1}^n S_i$$

$$\text{Risque cédé : } (1 - a)S = (1 - a) \times \sum_{i=1}^n S_i$$

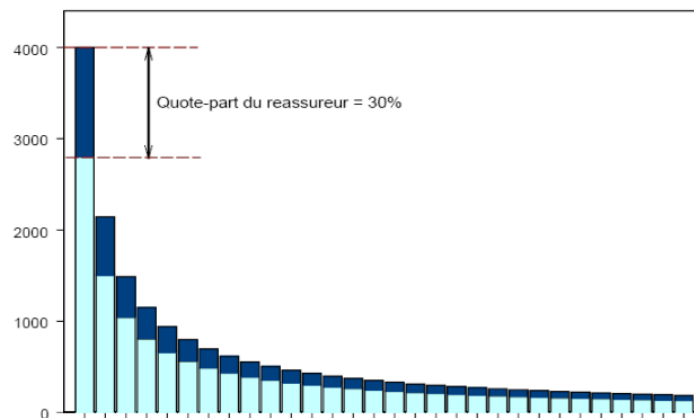


FIGURE 3.2 – Exemple de traité QP à 30% de cession

### • Excédent de Plein (Surplus)

Comme dans le cas du traité en quote-part, le réassureur prend en charge un pourcentage identique des primes et des sinistres. Toutefois, contrairement au quote-part où ce taux est fixé pour l'ensemble du portefeuille, ici, il est déterminé individuellement pour chaque police (sur la base de la somme assurée  $SI$  et non des sinistres).

Si on note  $a_i$  le taux de cession correspondant à la police  $i$ , on a :

$$a_i = \min \left\{ \max \left( \frac{SI_i - R}{SI_i}, 0 \right), \frac{C}{SI_i} \right\}$$

Avec :

- $SI_i$  : capital assuré correspondant au risque  $i$

- $C$  : capacité de l'excédent de plein

- $R$  : plein de rétention de la cédante

La répartition du risque entre la cédante et le réassureur se fait selon les règles suivantes :

- Si  $S_i < R$ , alors  $a_i = 0$  : la cédante conserve entièrement le sinistre  $i$ .
- Si  $R < S_i \leq C$ , alors la cédante cède au réassureur :  $a_i = \frac{S_i - R}{S_i} \times 100\%$ .
- Si  $S_i > C$ , alors la cédante cède au réassureur :  $a_i = \frac{C}{S_i} \times 100\%$ .

Tout comme dans le cas du système de quote-part, le réassureur s'engage à verser une commission de réassurance sur l'ensemble des primes cédées. L'avantage du traité d'excédent de plein pour la cédante réside dans la possibilité de conserver les risques de petite et moyenne envergure, tandis que le portefeuille global est nivelé : les sinistres les plus importants sont atténués. Toutefois, ce type de traité présente l'inconvénient d'être complexe à gérer, car il nécessite une gestion au niveau de chaque police individuelle. De plus, toute modification des sommes assurées implique une révision du traité. Il est important de souligner que ce traité nécessite l'existence d'une somme assurée associée au risque et ne peut pas être appliqué dans le cas de garanties illimitées, telles que celles liées à la responsabilité civile.

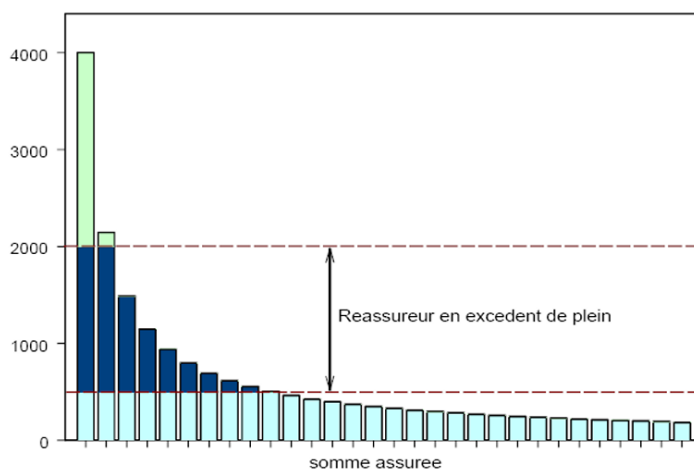


FIGURE 3.3 – Exemple d'excédent de plein

**Réassurance non-proportionnelle** Les traités de réassurance non proportionnels sont définis par une priorité ou déductible (assimilable à une franchise  $d$ ) et une portée ou limite (notée  $l$ ). Dans ce cadre, le réassureur prend en charge tout ou partie du sinistre excédant la priorité, dans la limite de la portée convenue. Contrairement à la réassurance proportionnelle, où la cédante et le réassureur partagent proportionnellement les résultats, la réassurance non proportionnelle crée une dissociation plus marquée entre les performances des deux parties. Ainsi, la cédante peut enregistrer une perte sur une période donnée sans que le réassureur ne soit nécessairement affecté de la même manière.

- **Réassurance en excédent de sinistre (Excess of Loss)**

La réassurance non proportionnelle permet de lisser les pics de sinistralité supportés par la cédante. Le réassureur intervient en prenant en charge la part du sinistre excédant la priorité du traité, tout en respectant la limite d'engagement fixée par la portée.

Le plafond du traité correspond à la somme de la priorité et de la portée. Ces traités sont généralement notés sous la forme :  $l \quad XS \quad d$

Ces traités peuvent être segmentés en plusieurs tranches, où le plafond d'une tranche correspond généralement à la priorité de la suivante.

On distingue deux principaux types de traités en excédent :

1. **L'excédent de sinistre par risque** : le réassureur intervient dès lors qu'une police individuelle subit un sinistre dépassant la priorité.
  - En assurance vie, le risque peut correspondre soit à un **contrat**, soit à une **tête assurée**.
  - Si le risque est défini par **contrat**, l'assureur conservera plusieurs franchises si plusieurs contrats d'un même assuré sont affectés.
  - Si le risque est défini par **tête assurée**, une seule priorité sera appliquée, même si plusieurs contrats de l'assuré sont concernés.
2. **L'excédent de sinistre par évènement** : le réassureur intervient dès que le total des sinistres liés à un même évènement dépasse la priorité du traité.
  - L'évènement est défini contractuellement en fonction de sa **nature** (incendie, inondation, tempête, etc.).
  - Une **durée maximale** est précisée, déterminant combien de temps les sinistres peuvent être imputés au même évènement.
  - Des **restrictions géographiques** peuvent également être appliquées.

La prime de réassurance est généralement exprimée sous la forme d'un **taux de prime** appliqué aux primes émises par la cédante.

Ces traités peuvent comporter d'autres caractéristiques :

1. **AAL (Annual Aggregate Limit)** : La limite annuelle d'engagement du réassureur, correspondant au montant maximal de remboursement sur la période de couverture.
2. **AAD (Annual Aggregate Deductible)** : Une franchise annuelle qui réduit l'engagement du réassureur et diminue le coût de la réassurance. Elle s'applique à la somme des montants dus par le réassureur avant activation de cette clause et peut être exprimée en pourcentage ou en valeur monétaire.

3. **Reconstitution de garantie** : Dans certains traités en excédent par évènement, le réassureur peut limiter son engagement à un nombre défini de sinistres. Lorsqu'un sinistre absorbe une partie de l'engagement, des reconstitutions de garantie peuvent être proposées, parfois gratuitement, sinon moyennant une prime ajustée selon le montant traversé et la durée restante du traité. Prime calculée selon un prorata temporel, soit  $Z$  le montant du sinistre excédant la priorité du traité. Le taux de prime additionnelle applicable est alors donné par :

$$\text{Taux de prime additionnelle} = \frac{Z \times \text{Durée restante}}{\text{portée} \times \text{Durée totale du traité}}$$

Prime calculée selon un prorata capital (en fonction du montant reconstitué), Soit  $S$  le montant total des sinistres constatés sur la période de référence, et  $C_j$  le coût de la  $j^{\text{ème}}$  reconstitution de couverture :

$$\text{Prime additionnelle} = \frac{\sum_{j=1}^n C_j \cdot \min(\max(S - j \cdot \text{Portée}, 0), \text{Portée})}{\text{Portée}}$$

4. **Clause de stabilité** : Présente dans les branches longues (ex. responsabilité civile), cette clause répartit l'impact de l'inflation sur les sinistres entre assureur et réassureur afin de maintenir les proportions initialement prévues. Elle peut inclure un seuil de déclenchement.
5. **PMD (Prime Minimum et de Dépôt)** : La prime de réassurance étant incertaine lors de la signature du traité, une prime minimum et de dépôt est versée au réassureur, généralement à hauteur de 80 % de la prime estimée.
- Elle est ajustée en fin d'année selon l'assiette et le taux de prime.
  - La prime finale est toujours supérieure ou égale à la prime minimum déposée.
  - La prime de dépôt peut être inférieure à la prime minimum.

Si l'on considère  $X$  comme le montant d'un sinistre couvert par un traité en excédent de sinistre ( $XS$ ) à une tranche donnée, et  $S$  comme le sinistre à la charge du réassureur, alors :

$$S = \min \{ \max(X - \text{Priorité}, 0), \text{Portée} \}$$

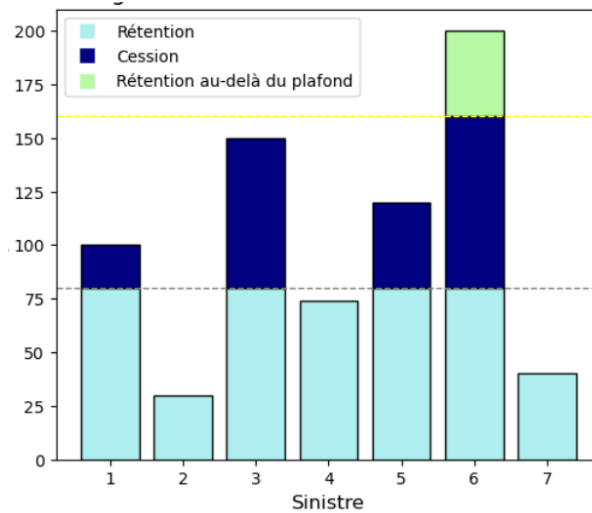


FIGURE 3.4 – Exemple d'excédent de sinistre

- **Excédent de Perte Annuelle (Stop loss)**

Le traité en excédent de perte annuelle, également appelé *stop-loss*, permet à l'assureur de couvrir la totalité des sinistres sur une période donnée. La priorité du stop-loss correspond à la sinistralité annuelle que l'assureur conserve, et elle peut être exprimée soit en montant, soit en pourcentage des primes acquises durant la période. Ce type de traité est particulièrement pertinent dans les branches où un grand nombre de petits sinistres peuvent générer des coûts importants, comme dans le cas de la grêle, où la sinistralité peut fluctuer fortement à cause d'intempéries. Il est également utilisé dans les branches récentes ou en développement, où les écarts de sinistralité sont difficiles à mesurer en raison de la petite taille du portefeuille. Le stop-loss intervient lorsque l'assureur cherche à se protéger contre des résultats financiers défavorables. Plutôt que de se concentrer sur les montants des sinistres, il se base sur les résultats globaux des polices sinistrées pendant la période du traité. Le réassureur s'engage à couvrir la partie du montant qui dépasse un seuil financier spécifique, au-delà duquel l'assureur serait en perte. Les limites de ce type de traité sont généralement exprimées sous forme de ratio sinistres/primes (loss ratio) ou sinistres/capitaux, où :

$$\text{Loss ratio} = \frac{\text{Coûts des sinistres}}{\text{Total des primes reçues}}$$

Soient  $(X_i)_{i=1,\dots,n}$  les sinistres subis par la cédante durant la période de couverture,  $P$  la somme des primes acquises par la cédante, et  $S$  le montant du sinistre pris en charge par le réassureur. La formule mathématique du Stop Loss s'exprime ainsi :

$$S = \min \left\{ \max \left( \frac{\sum X_i}{P} - \text{Priorité}, 0 \right), \text{Portée} \right\} \times P$$

où la priorité et la portée sont exprimées en pourcentage des primes acquises.

### 3.1.4 Tarification

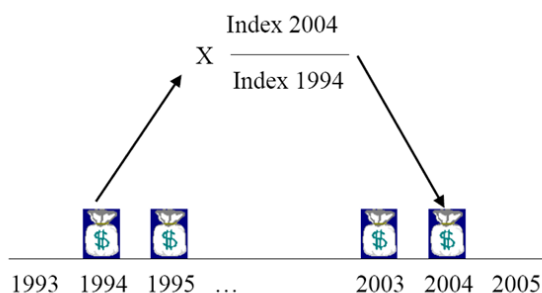
#### 3.1.4.1 Traitement de l'historique sinistre

L'une des difficultés essentielles en tarification est de prendre correctement en compte l'environnement socio-économique, i.e. l'inflation et l'hyperinflation.

La cédante communique à titre d'information ses sinistres individuels sur une période de référence et la réassurance doit transformer cette information pour qu'elle soit capable de refléter l'environnement de l'année de couverture. D'où vient l'idée d'établir une statistique As If.

Cette statistique est élaborée selon un processus en plusieurs étapes :

- **Actualisation** : elle permet de neutraliser l'effet de l'inflation économique sur les données historiques.
- **Redressement** : il consiste à ajuster la statistique en fonction de l'évolution du portefeuille dans le temps, notamment en tenant compte du nombre de polices, des capitaux assurés et de la structure des garanties.
- **Revalorisation** : cette étape intègre l'évolution du coût des risques, en prenant en compte notamment l'impact de la jurisprudence et l'application éventuelle d'une surinflation.



#### 3.1.4.2 Modèle basé sur l'expérience : Burning cost (Le taux de flambage)

Par principe, le burning cost est basé sur la sinistralité historique pour définir la sinistralité à venir. Cette méthode sert généralement à coter les traités excédents de sinistre.

L'application de cette approche se déroule en trois étapes :

- Création de la statistique As If
- Cotation de taux pur
- Cotation de taux commercial

$$BC = \frac{\text{Coût des sinistres pris en charge par le réassureur}}{\text{Total des primes perçues}}$$

Alors le montant de la prime pure est donné par :

$$P_{\text{pure}} = BC \times \text{l'assiette de prime de l'année de cotation}$$

### 3.1.4.3 Modèle probabiliste

Fondée sur la modélisation probabiliste de la fréquence et de la sévérité des sinistres à partir des données observées, cette approche vise à produire des estimations fiables permettant de tarifier des segments de portefeuille pour lesquels l'information est limitée.

Soit un traité de réassurance de type excédent de sinistre (XS), noté  $\mathbf{C \text{ xs } P}$ , où  $P$  représente la priorité (ou franchise) et  $C$  la capacité maximale prise en charge par le réassureur. On note  $X_i$  les montants individuels des sinistres.

La fonction  $f(X_i)$  désigne la charge supportée par le réassureur pour chaque sinistre et est appelée fonction de compensation. Dans le cadre d'un traité XS, cette fonction est définie par :

$$f(X_i) = \min(C, \max(0, X_i - P))$$

Les  $X_i$  sont supposées être des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) selon une loi  $X$ , et le nombre de sinistres annuels  $N$  est une variable aléatoire indépendante des  $X_i$ . La sinistralité agrégée totale est donnée par :

$$S = \sum_{i=1}^N X_i$$

La charge XS par sinistre est alors notée :

$$R_i = f(X_i) = \min(C, \max(0, X_i - P))$$

Et la sinistralité annuelle agrégée du réassureur (charge totale) est :

$$S_R = \sum_{i=1}^N R_i$$

L'espérance de la charge par sinistre, notée  $\mathbb{E}[R]$ , s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\mathbb{E}[R] = \int_P^{P+C} (x - P) f_X(x) dx + \int_{P+C}^{\infty} C f_X(x) dx$$

où  $f_X(x)$  est la densité de la variable aléatoire  $X$ .

Les modèles classiques retenus sont généralement :

- Pour la fréquence des sinistres :  $N \sim \mathcal{P}(\mu)$ , la loi de Poisson, en raison de ses propriétés adaptées aux processus de renouvellement (absence de mémoire, propriété de Markov) ;
- Pour la sévérité :  $X \sim \text{Pareto}(\alpha, \lambda)$ , dont la fonction de répartition est donnée par :

$$F(x) = 1 - \left( \frac{\lambda}{\lambda + x} \right)^\alpha, \quad \forall x > 0$$

## 3.2 Impact de la réassurance

La réassurance permet principalement de stabiliser la volatilité des sinistres et d'uniformiser la répartition des risques au sein du portefeuille de l'assureur cédant.

L'impact de la réassurance, qu'elle soit proportionnelle ou non-proportionnelle, est pris en compte à la fois dans l'évaluation des fonds propres et dans la détermination du besoin en capital. En conséquence, la réassurance devient un levier stratégique dans la gestion du capital de l'assureur.

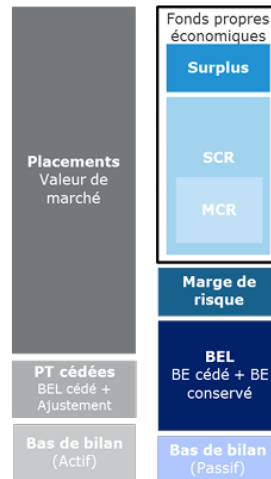


FIGURE 3.5 – Bilan économique avec réassurance

### 3.2.1 Impact de la réassurance sur le résultat net

La part des sinistres transférée au réassureur dans le cadre d'un programme de réassurance comprenant  $n$  traités est :

$$\text{Part réassureur sinistres}_t = \sum_{j=1}^n \text{Part réassureur sinistres}_t^{(j)}$$

La part des primes transférée au réassureur dans le cadre d'un programme de réassurance comprenant  $n$  traités est :

$$\text{Part réassureur primes}_t = \sum_{j=1}^n \text{Part réassureur primes}_t^{(j)}$$

Le réassureur perçoit une fraction de la prime d'assurance directe, destinée à couvrir les sinistres, et aussi à financer les frais d'acquisition, de gestion et le profit de l'assureur. Il est donc logique qu'il contribue proportionnellement à ces charges. Pour ce faire, il reverse à l'assureur une commission de réassurance, qui compense en partie les frais d'acquisition et de gestion supportés par ce dernier. C'est pour cette raison que, dans le cadre de la cession des frais d'acquisition et de gestion, le réassureur verse à la cédante une commission de réassurance fixée par négociation.

$$\text{Commission réassurance}_t = \alpha\% \times \text{Part réassureur primes}_t^{(j)}$$

Le résultat final de la réassurance, du point de vue de la cédante, s'exprime comme suit :

$$\text{Résultat} = \text{Part réassureur sinistres}_t - \text{Part réassureur primes}_t + \text{Commission réassurance}_t$$

### 3.2.2 Impact de la réassurance sur le pilier 1

**Le Best Estimate** est calculé brut et net de réassurance et la différence entre BE brut et net apparaît comme une créance à l'actif. Le BE cédé prend en compte un ajustement fondé sur la probabilité de défaut et la perte moyenne résultant de ce défaut.

$$\text{BE}_{\text{brut}} = \text{BE}_{\text{cédé}} + \text{BE}_{\text{conservé}}$$

$$\text{BE}_{\text{brut}} = \sum_{i=1}^T \frac{\text{Sinistres}_i - \text{Primes}_{\text{com},i} + \text{FraisGénéraux}_i - \text{Commissions}_i - \text{PB}_i}{(1 + r(i))^i}$$

$$\text{BE}_{\text{conservé}} = \text{BE}_{\text{brut}} - \sum_{i=1}^T \frac{\text{PartRéassureurSinistres}_i - \text{PartRéassureurPrimes}_i}{(1 + r(i))^i}$$

L'actif de réassurance reconnu en contrepartie est :

$$\text{Provisions techniques cédées} = \text{BE}_{\text{cédé}} + \text{Adj}_{\text{cédé}}$$

$$\text{ADJ}_{\text{cédé}} = - \max \left( 0.5 \times \frac{PD}{1 - PD} \times \text{Durmod} \times \text{BE}_{\text{cédé}}, 0 \right)$$

où

**PD** : probabilité de défaut de la contrepartie sur un horizon de 12 mois ;

**Durmod** : duration modifiée des montants recouvrables au titre des contrats de réassurance ;

**BE<sub>cédé</sub>** : Best Estimate des flux cédés.

**Le SCR** est déterminé net de réassurance, le transfert de risque qu'elle opère entraînant généralement une diminution du SCR de souscription, tout en occasionnant une hausse du SCR de contrepartie.

On calcul donc SCR contrepartie comme suit :

$$\text{SCR}_{\text{Contrepartie 1}} = \begin{cases} 3 \times \sqrt{V_{\text{inter}} + V_{\text{intra}}}, & \text{si } \frac{\sqrt{V_{\text{inter}} + V_{\text{intra}}}}{\sum_i \text{LGD}_i} \leq 7\% \\ 5 \times \sqrt{V_{\text{inter}} + V_{\text{intra}}}, & \text{si } 7\% < \frac{\sqrt{V_{\text{inter}} + V_{\text{intra}}}}{\sum_i \text{LGD}_i} \leq 20\% \\ \sum_i \text{LGD}_i, & \text{si } \frac{\sqrt{V_{\text{inter}} + V_{\text{intra}}}}{\sum_i \text{LGD}_i} > 20\% \end{cases}$$

Les pertes en cas de défaut de la contrepartie pour un contrat d'acceptation en réassurance sont définies comme suit :

$$\text{LGD}_i = \max \left( \begin{aligned} &\text{Dépôts en espèces auprès de la cédante}_i + \text{Créance sur la cédante}_i \\ &- \text{Provisions techniques}_i, 0 \end{aligned} \right)$$

Où :

- **Dépôts en espèces auprès de la cédante** : Ce sont les montants que le réassureur dépose chez la cédante en garantie des engagements pris.
- **Créance sur la cédante** : Il s'agit des montants que la cédante doit au réassureur.
- **Provisions techniques** : le montant des provisions techniques acceptées avec la cédante

$$\text{TLGD}_k = \sum_{\substack{\text{contrepartie } i \\ \text{ayant la même notation } k}} \text{LGD}_i$$

$$\begin{cases} V_{\text{inter}} = \sum_{j,k} \frac{PD_k \cdot (1 - PD_k) \cdot PD_j \cdot (1 - PD_j)}{1,25 \cdot (PD_j + PD_k) - PD_j \cdot PD_k} \cdot \text{TLGD}_k \cdot \text{TLGD}_j \\ V_{\text{intra}} = \sum_j \frac{1,5 \cdot PD_j \cdot (1 - PD_j)}{2,5 - PD_j} \cdot \sum_{i \in PD_j} \text{LGD}_i^2 \end{cases}$$

Avec :

- $PD_j$  et  $PD_k$  : probabilités de défaut des contreparties  $j$  et  $k$  respectivement.
- $\text{TLGD}_j$  et  $\text{TLGD}_k$  : sommes des pertes en cas de défaut pour les contreparties dont la probabilité de défaut est respectivement  $PD_j$  et  $PD_k$ .
- $\sum_{PD_j} \text{LGD}_i^2$  : somme des carrés des pertes en cas de défaut pour toutes les expositions dont la probabilité de défaut est  $PD_j$ .

### 3.3 Optimisation de la stratégie de réassurance

En tant qu'outil clé de maîtrise des risques de fréquence et de gravité, la réassurance s'insère dans une approche stratégique construite conjointement par la direction de l'entreprise et les

équipes actuarielles. Alors que le top management définit les ambitions financières et les niveaux de tolérance au risque, il revient aux actuaires de structurer des programmes de réassurance efficaces, alignés sur ces objectifs, tout en assurant la robustesse du portefeuille face aux scénarios défavorables.

Nous détaillerons ci-après les deux approches que nous avons adopter pour l'optimisation du programme de réassurance.

### 3.3.1 Optimisation non linéaire sous contraintes : approche classique

L'optimisation non linéaire sous contraintes est une méthode classique d'optimisation qui consiste à maximiser ou minimiser une fonction objectif non linéaire, tout en respectant un ensemble de contraintes, qui peuvent elles-mêmes être non linéaires.

En d'autres termes, elle sert à résoudre les problèmes de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 &\text{Maximiser} && f(x) \\
 &\text{sous les contraintes} && g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\
 & && h_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, p \\
 & && x \in \mathbb{R}^n
 \end{aligned}$$

où :

- $f(x)$  est la fonction objectif à maximiser ;
- $g_i(x)$  sont les fonctions représentant les contraintes d'inégalité ;
- $h_j(x)$  sont les fonctions représentant les contraintes d'égalité ;
- $x$  est le vecteur des variables de décision.

Pour résoudre un tel problème, nous avons recours souvent à la méthode de Lagrange.

La fonction de Lagrange, notée  $\mathcal{L}(x, \lambda, \mu)$ , est définie de la manière suivante :

$$\mathcal{L}(x, \lambda, \mu) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x) + \sum_{j=1}^p \mu_j h_j(x)$$

où :

- $\lambda_i \geq 0$  sont les multiplicateurs de Lagrange associés aux contraintes d'inégalité ;
- $\mu_j$  sont les multiplicateurs de Lagrange associés aux contraintes d'égalité.

Pour qu'une configuration  $x^*$  soit la solution optimale du problème défini ci-dessus, il faut qu'il vérifie un ensemble de conditions appelées **Conditions de Karush-Kuhn-Tucker (KKT)**.

Ces conditions KKT sont au nombre de cinq.

1. **Stationnarité :**

$$\nabla f(x^*) + \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \nabla g_i(x^*) + \sum_{j=1}^p \mu_j^* \nabla h_j(x^*) = 0$$

2. **Primalité :**

$$g_i(x^*) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

$$h_j(x^*) = 0, \quad j = 1, \dots, p$$

3. **Dualité :**

$$\lambda_i^* \geq 0, \quad i = 1, \dots, m$$

4. **Complémentarité :**

$$\lambda_i^* \cdot g_i(x^*) = 0, \quad i = 1, \dots, m$$

Ainsi, ces conditions constituent un système d'équations et d'inéquations dont la solution correspond à l'optimum recherché.

### 3.3.2 Méthodes d'optimisation multi-objectif

Les méthodes d'optimisation multicritère ne suivent pas toutes la même logique : elles se différencient notamment par le rôle qu'elles accordent aux préférences du décideur. En effet, lorsque plusieurs solutions Pareto optimales sont disponibles, ce sont souvent ces préférences qui permettent de départager les options et de choisir celle qui répond le mieux aux objectifs de l'entreprise.

On distingue généralement trois grandes catégories d'approches :

**a. Les approches à posteriori**

Dans ce cas, on commence par explorer l'espace des solutions afin d'estimer l'ensemble ou une partie représentative de la frontière de Pareto. Ce n'est qu'une fois cet ensemble obtenu que le décideur intervient pour sélectionner, selon ses préférences, la solution qui lui convient le mieux. Ce type d'approche offre une bonne vision d'ensemble des compromis possibles, mais peut être coûteux en termes de calcul.

**b. Les approches à priori**

Ici, les préférences du décideur sont exprimées dès le départ, souvent sous la forme d'une fonction d'utilité ou d'une relation d'ordre sur les objectifs. Ces préférences guident directement la recherche des solutions, ce qui permet de se concentrer uniquement sur celles qui sont considérées comme acceptables. Cependant, cela suppose que le décideur

soit capable de formuler ses préférences de manière précise en amont, ce qui n'est pas toujours évident.

### c. Les approches interactives

A mi-chemin entre les deux précédentes, ces méthodes reposent sur une interaction continue entre l'algorithme et le décideur. Les préférences sont recueillies et ajustées progressivement, au fur et à mesure de l'exploration de l'espace des solutions. Cette flexibilité permet de mieux cerner les attentes du décideur tout en affinant les résultats au fil des itérations.

Pour notre cas, nous avons opté pour une approche à posteriori laquelle nous a permis d'obtenir l'intégralité de la frontière de Pareto. Il nous revient ensuite à choisir la solution qui répond au plus à notre appétence de risque et à nos objectifs de rentabilité.

## 3.3.3 Algorithmes génétiques

### 3.3.3.1 Pourquoi choisir un algorithme génétique ?

Les problèmes d'optimisation à objectifs multiples ont souvent été simplifiés en problèmes mono-objectifs via différentes techniques de transformation. Par exemple, la méthode de **scalarisation linéaire** consiste à combiner les différents objectifs en une somme pondérée. Autrement dit, on attribue un poids à chaque objectif, ce qui nous ramène à résoudre un seul problème d'optimisation du type :

$$\min_{\omega \in \Omega} \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i(\omega)$$

En faisant varier ces poids, il est possible d'explorer différentes solutions situées sur la frontière de Pareto. Cette approche permet de recourir à des méthodes classiques d'optimisation, comme la descente de gradient. Toutefois, cette méthode peut vite devenir lourde et inefficace car elle nécessite de tester un grand nombre de combinaisons de poids, ce qui peut être coûteux en temps de calcul.

Une autre technique utilisée est la méthode dite des  $\varepsilon$ -contraintes. Elle consiste à choisir un objectif principal à optimiser tout en transformant les autres en contraintes à respecter, de la forme :

$$\min_{\omega \in \Omega} f_j(\omega) \quad \text{sous les contraintes} \quad f_i(\omega) \leq \varepsilon_i, \quad \forall i \neq j$$

En variant ces seuils  $\varepsilon_i$ , on peut également reconstruire la frontière de Pareto. Cependant, cette approche nécessite des choix souvent arbitraires, notamment sur l'objectif principal à retenir et sur les valeurs des contraintes, ce qui complique son application pratique.

C'est ici que les *algorithmes génétiques*, en particulier les méthodes évolutionnistes multiobjectifs, montrent tout leur intérêt. Ces algorithmes permettent d'aborder directement le problème dans sa dimension multiobjectif, sans avoir besoin de transformer les objectifs en une seule fonction à optimiser. Ils cherchent simultanément un ensemble de solutions qui approximativement forment la frontière de Pareto.

Un autre avantage majeur des algorithmes génétiques est qu'ils ne nécessitent aucune hypothèse de dérivabilité des fonctions objectif.

### 3.3.3.2 Contexte général

Les algorithmes génétiques font partie de la famille des méthodes évolutionnistes. Ils s'inspirent de la théorie de Darwin et du principe de sélection naturelle : une population de solutions évolue au fil des générations par sélection, croisement (cross-over) et mutation, dans le but d'améliorer progressivement la qualité et la pertinence des solutions.

L'origine des algorithmes génétiques remonte aux travaux de John Holland dans les années 1960 à l'Université du Michigan. Il fut le premier à formaliser leur fonctionnement, notamment en introduisant l'opérateur de croisement, qui permet de combiner l'information génétique de deux individus pour générer de nouvelles solutions potentiellement meilleures.

L'analogie avec la génétique biologique se reflète également dans la terminologie utilisée : chaque solution est représentée comme un individu dont le génotype (représentation codée) évolue au sein d'une population. Les opérateurs génétiques agissent sur cette structure afin d'explorer efficacement l'espace des solutions, sans nécessiter de conditions strictes comme la dérivabilité des fonctions objectif.

### 3.3.3.3 Éléments de base pour le fonctionnement des algorithmes génétiques

Avant d'entrer dans le vif du sujet lié à l'optimisation par les algorithmes génétiques, il convient de poser quelques éléments fondamentaux qui serviront de socle à notre démarche. Ces notions, telles que la frontière efficiente ou la dominance au sens de Pareto, sont essentielles pour bien comprendre les logiques sous-jacentes à la recherche d'un équilibre optimal entre rentabilité et maîtrise du risque.

#### 1. Dominance au sens de Pareto

Soit (P) un problème d'optimisation défini comme suit :

$$(P) : \begin{cases} \max f_i(x), & \text{pour } i = 1, \dots, M \\ \text{S.c : } g_j(x) \geq 0, & \text{pour } j = 1, \dots, K \end{cases}$$

Où  $f_i(x)$  désigne la fonction  $f_i$  après application de la réassurance  $x$  sur le risque concerné.

Soient  $\mathcal{T}$  l'ensemble des traités ou programmes et  $\mathcal{T}_S$  l'ensemble des solutions admissibles de (P).

$$\mathcal{T}_S = \{x \in \mathcal{T} \mid x \text{ solution de } (P)\} \subset \mathcal{T}$$

**Définition :**

Soient  $x_1$  et  $x_2$  deux éléments de  $\mathcal{T}_S$ .

On dit que  $x_1$  domine  $x_2$  au sens de Pareto si :

$$\begin{aligned} &\forall i \in \{1, 2, \dots, M\}, f_i(x_2) \leq f_i(x_1) \\ &\exists j \in \{1, 2, \dots, M\} \text{ tel que } f_j(x_2) < f_j(x_1) \end{aligned}$$

Et on note  $x_2 \prec x_1$ .

**2. Optimum de Pareto**

Soit  $x \in \mathcal{T}$ .

On dit que  $x$  est un optimum de Pareto s'il n'existe aucun  $y$ , élément de  $\mathcal{T}$  tel que  $x \prec y$ .

**3. Frontière efficiente ou Frontière de Pareto**

La frontière de Pareto, notée *frontPareto*, est définie comme l'ensemble des solutions Pareto-optimales de  $\mathcal{T}$ , telles que :

$$\mathcal{P}_a = \{x \in \mathcal{T} \mid \nexists y \in \mathcal{T}, x \prec y\}$$

La frontière de Pareto *frontPareto* est donc définie par :

$$\text{frontPareto} = \{f(x) = (f_1(x), \dots, f_M(x)) \mid x \in \mathcal{P}_a\}$$

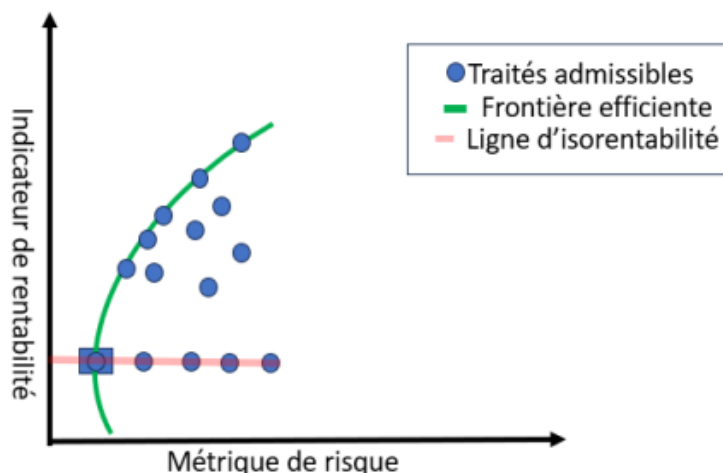


FIGURE 3.6 – Frontière efficiente et traités optimaux de réassurance

### 3.3.3.4 Fonctionnement général des algorithmes génétiques

Dans leur déroulement, les algorithmes génétiques passent itérativement par plusieurs étapes, au nombre de cinq :

1. Évaluation des fonctions objectifs pour tous les individus de la population.
2. Sélection des individus performants qui deviendront des parents.
3. Reproduction de ces parents pour obtenir des individus enfants.
4. Application éventuelle d'une mutation sur certains individus.
5. Mise à jour de la population en la remplaçant par les nouveaux individus.

On distingue trois opérateurs essentiels au bon fonctionnement de ces algorithmes :

- **L'opérateur de sélection**

Cet opérateur a pour rôle de choisir les individus de la population qui participeront à l'étape de reproduction. La sélection peut se faire de manière déterministe, en classant les individus selon leurs performances et en retenant les meilleurs, ou de façon probabiliste, afin de laisser une chance à des individus moins performants d'être sélectionnés, favorisant ainsi la diversité génétique.

- **L'opérateur de reproduction (ou croisement)**

Cet opérateur permet de combiner les caractéristiques de deux individus sélectionnés (les parents) afin de générer de nouveaux individus appelés enfants. Il vise à exploiter les bonnes propriétés des solutions existantes pour en créer de meilleures.

- **L'opérateur de mutation**

Pour introduire de la diversité au sein de la population, cet opérateur modifie aléatoi-

rement certains individus (parents ou enfants). Lorsqu'une mutation s'avère bénéfique, elle peut se transmettre aux générations suivantes ; dans le cas contraire, l'opérateur de sélection l'éliminera naturellement du processus évolutif.

Maintenant que nous avons introduit les algorithmes génétiques ainsi que leurs principes de fonctionnement de base, il est temps de formaliser la démarche mathématiquement.

### 3.3.3.5 Algorithmes génétiques : Formulation mathématique

Pour bien illustrer la démarche concrète de l'algorithme génétique, considérons un portefeuille composé de  $n$  risques  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , associés respectivement aux primes  $P_1, P_2, \dots, P_n$ . On suppose que les risques sont indépendants et que chacun peut être couvert par un contrat de réassurance proportionnelle ou non proportionnelle.

Pour un risque  $X$ , le contrat de réassurance définit la portion  $R$  conservée par la cédante et la portion  $R^c = 1 - R$  transférée au réassureur. Bien évidemment, la part prise en charge par le réassureur ne doit en aucun cas excéder le montant total du sinistre :

$$0 \leq R(X) \leq X.$$

La prime de réassurance est supposée calculée selon la formule suivante :

$$\Pi(R(X)) = \mathbb{E}[R(X)] + C(R(X)),$$

où  $C(\cdot)$  représente les chargements appliqués au risque cédé.

La fonction  $f$ , représentant le bénéfice de souscription de la cédante, est définie par :

$$f(\lambda) = \sum_{i=1}^n [P_i - R(X_i) - \Pi(R(X_i))].$$

Cette fonction dépend de :

- Le facteur de proportionnalité  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ , avec  $0 < \alpha_i < 1$ , dans le cas d'une réassurance proportionnelle ;
- Les limites de rétention  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ , dans le cas d'une réassurance non proportionnelle ;
- Les chargements de sécurité du réassureur  $\eta^r = (\eta_1^r, \dots, \eta_n^r)$ , supposés connus.

L'espérance du bénéfice est alors donnée par :

$$\mathbb{E}[f(\lambda)] = \sum_{i=1}^n [P_i - \mathbb{E}[R(X_i)] - \Pi(R(X_i))],$$

où  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  représente soit les  $\alpha_i$ , soit les  $\beta_i$ , selon le type de réassurance envisagé.

Un indicateur de solvabilité peut être représenté soit par le bénéfice de l'assureur, soit par la probabilité de ruine, cette dernière étant notée  $g(f(\lambda))$ .

On définit alors une fonction agrégée :

$$Z(\lambda) = \mathbb{E}[f(\lambda)] - g(f(\lambda)),$$

qui combine la rentabilité espérée avec une pénalisation liée au risque de solvabilité.

L'objectif est alors de déterminer le vecteur optimal  $\lambda$  qui maximise  $Z(\lambda)$  sous un ensemble de contraintes, en s'appuyant sur un algorithme génétique et une base de données regroupant les structures de réassurance, le niveau d'appétence au risque de la compagnie ainsi que ses objectifs de rentabilité.

La population est constituée d'individus, chacun étant représenté par un vecteur de paramètres  $\lambda_i$ .

L'étape suivante consiste à évaluer les individus générés à l'aide de la fonction objectif définie par :

$$Z(\lambda) = \mathbb{E}[f(\lambda)] - g(f(\lambda)).$$

Une fois les individus évalués, le meilleur d'entre eux est sélectionné à l'aide d'une roue de sélection, avec une probabilité  $P_i$  associée à chaque individu :

$$P_i = \frac{Z_i - \min(Z)}{\sum_{j \in \text{Pop}} (Z_j - \min(Z))}.$$

Chaque individu est reproduit avec une certaine probabilité. Certains seront favorisés et auront plus de chances d'être sélectionnés pour la reproduction, tandis que d'autres seront progressivement éliminés de la population.

Une opération de croisement est ensuite réalisée entre deux individus (parents) afin de générer deux nouveaux individus (enfants). Cela se fait en sélectionnant aléatoirement un point de croisement, puis en échangeant les segments terminaux des deux parents.

Pour garantir une bonne exploration de l'espace des solutions, une opération de mutation est ensuite appliquée. Elle consiste à modifier aléatoirement un gène d'un individu en le remplaçant par une nouvelle valeur admissible.

Si les résultats obtenus satisfont les critères définis, l'individu optimal est conservé comme solution. Dans le cas contraire, les étapes d'évaluation, de sélection, de croisement et de mutation sont répétées sur plusieurs générations jusqu'à atteindre un critère d'arrêt (nombre maximal de générations ou convergence).

Les vecteurs obtenus  $\lambda_i$ , pour  $i = 1, \dots, n$ , constituent alors les solutions optimales maximisant la fonction  $Z(\lambda)$ .

Pour notre projet, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme NSGA-II, que nous présenterons en détail ci-après.

### 3.3.3.6 NSGA-II

L'algorithme **NSGA-II**, acronyme de **Nondominated Sorting Genetic Algorithm II**, est un algorithme génétique largement privilégié pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectifs. Il procède à un classement des individus en leur appliquant une hiérarchie basée sur les frontières de Pareto.

Cependant, dans un cadre multi-objectifs, la dominance de Pareto ne définit pas une relation d'ordre total sur l'espace des objectifs. Autrement dit, les solutions ne peuvent pas être comparées entre elles. Pour pallier cette limite, l'algorithme introduit un critère supplémentaire : la *crowding distance*, qui permet de départager les individus appartenant à une même frontière en tenant compte de leur densité locale dans l'espace des objectifs.

Ci-après, un schéma illustre les différentes étapes de l'algorithme NSGA-II, suivi d'une explication détaillée de chacune d'elles.

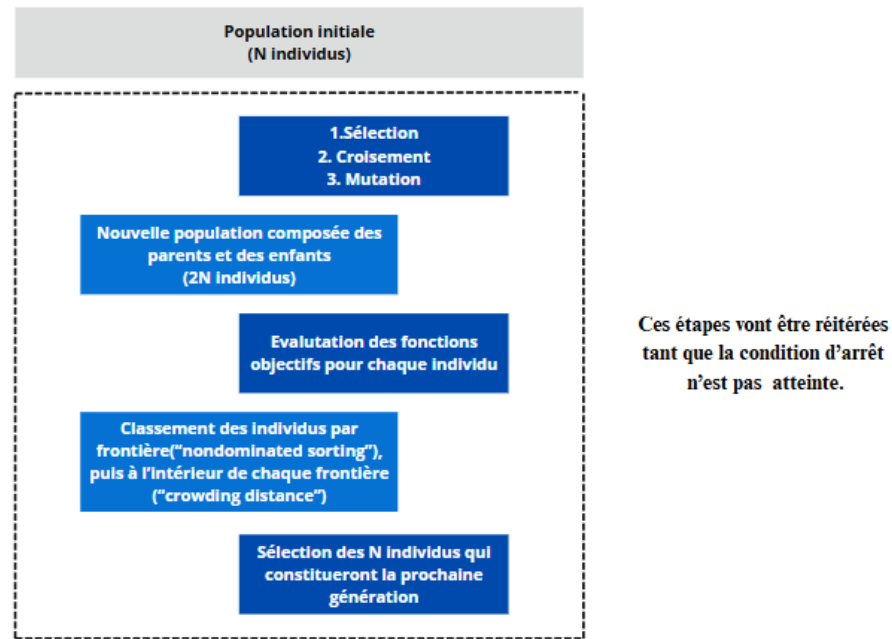


FIGURE 3.7 – Etapes de l'algorithme NSGA-II

### 1. Classement par frontière de Pareto

Selon cette méthode, les individus sont classés par frontière. Ceux qui ne sont pas dominés forment la frontière  $F_1$ . Puis, sur l'ensemble restant, ceux qui ne sont pas dominés vont former la frontière  $F_2$ , et ainsi de suite jusqu'à ce qu'il n'ait plus d'individus. On obtient donc, pour un ensemble d'individus  $\tilde{\Omega}$ , un ensemble de  $l$  frontières  $\{F_1, F_2, \dots, F_l\}$  tel que  $\bigcup_{i \in \{1, \dots, l\}} F_i = \tilde{\Omega}$ .

Comme l'objectif est de conserver les  $N$  individus les plus pertinents, on commence par intégrer les individus de la frontière  $F_1$ , en raison du fait qu'ils sont les meilleurs par principe. Si le nombre d'individus souhaité n'est pas toujours atteint, on rajoute ceux de  $F_2$ , et ainsi de suite.

Or, il se peut que certains individus d'une même frontière suffisent pour atteindre  $N$  individus. Ceci exige donc de faire un classement au sein de la frontière elle-même, d'où l'utilité de la *crowding distance*.

### 2. Classement par crowding-distance

Dans l'algorithme NSGA-II, l'objectif n'est pas seulement de garder les meilleurs individus, mais aussi de maintenir une bonne diversité au sein de la population. Lorsqu'on se trouve sur une même frontière de Pareto, tous les individus sont considérés comme équivalents du point de vue des objectifs. C'est là qu'intervient la notion de crowding-distance : elle permet d'évaluer à quel point un individu est entouré ou isolé des autres. Plus un individu est « seul » dans l'espace des solutions, plus sa crowding-distance est élevée.

Pour départager les individus d'une même frontière, on les trie donc selon leur crowding-distance décroissante. Et s'il y a égalité, on en sélectionne un au hasard. Cela permet de favoriser les individus les plus dispersés, et donc de préserver la diversité de la population, ce qui est essentiel pour explorer efficacement l'espace des solutions.

Pour ce faire, on procède au sein d'une frontière  $F$  de  $n$  individus de la manière suivante :

- Pour chaque fonction objectif  $f_i$ ,  $i \in \{1, \dots, k\}$ , on calcule la distance de chaque individu relativement à cet objectif :  $d_i(\omega_m)$ , pour tout  $m \in \{1, \dots, n\}$ , selon les étapes suivantes.
- Les résultats  $f_i(\omega_m)$ ,  $m \in \{1, \dots, n\}$  sont triés par ordre croissant :

$$f_i(\omega_{i1}) \leq f_i(\omega_{i2}) \leq \dots \leq f_i(\omega_{in})$$

avec  $i1, \dots, in$  les indices des individus triés selon l'objectif  $f_i$ .

- On fixe la distance des individus aux extrémités à l'infini (ils seront donc prioritairement sélectionnés) :

$$d_i(\omega_{i1}) = d_i(\omega_{in}) = +\infty$$

- Pour les autres individus, on attribue la distance normalisée suivante :

$$\forall j \in \{2, \dots, n-1\}, \quad d_i(\omega_{ij}) = \frac{f_i(\omega_{ij+1}) - f_i(\omega_{ij-1})}{f_i(\omega_{in}) - f_i(\omega_{i1})}$$

- La *crowding-distance* de l'individu  $\omega_m$ ,  $m \in \{1, \dots, n\}$  est ensuite obtenue en sommant les distances pour tous les objectifs :

$$d(\omega_m) = \sum_{i=1}^k \sum_{ij=m} d_i(\omega_{ij})$$

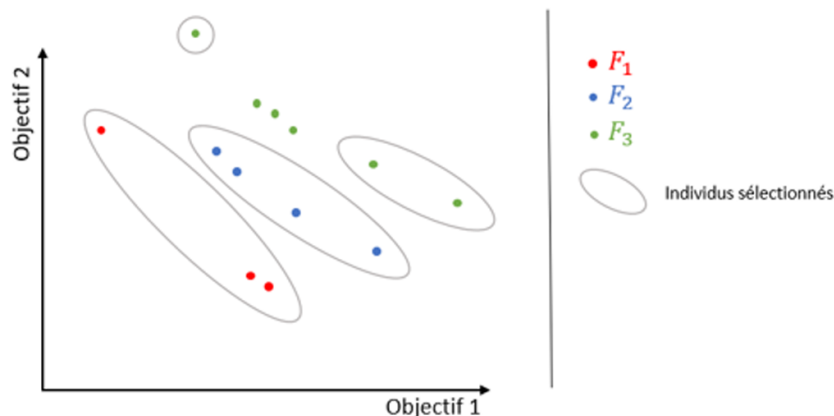


FIGURE 3.8 – Illustration graphique de la sélection des individus

Après avoir sélectionné les individus des frontières bleue et rouge, il restait encore trois individus à retenir sur la frontière verte. Ceux qui ont été entourés ont été choisis car ils présentent les plus grandes valeurs de crowding-distance.

## Les opérateurs utilisés dans l'algorithme NSGA-II

### 1. Opérateur de sélection des parents :

Pour sélectionner les individus qui se reproduiront, l'algorithme utilise la sélection dite **par tournoi**. Un certain nombre d'individus est tiré au hasard, et le futur parent est le meilleur au sens de la Pareto-dominance (ou de la **crowding-distance** si ces individus appartiennent à la même frontière).

La taille du tournoi par défaut est de 2.

### 2. Opérateur de reproduction :

L'opérateur **Bounded Simulated Binary Crossover** (SBX) permet de créer deux descendants à partir de deux parents. Les caractéristiques des descendants sont obtenues à partir de celles des parents en tirant aléatoirement un paramètre dit **de spread** noté  $\beta$ .

Le paramètre  $\beta_i$  est tiré selon la loi de probabilité définie par la densité suivante :

$$f(\beta) = \begin{cases} 0.5 \cdot (\eta_x + 1) \cdot \beta^{\eta_x}, & \text{si } 0 \leq \beta \leq 1, \\ 0.5 \cdot (\eta_x + 1) \cdot \beta^{-(\eta_x+2)}, & \text{si } \beta > 1. \end{cases}$$

Ce paramètre permet de contrôler l'écart entre les descendants : plus il est élevé, plus les caractéristiques des descendants seront différentes.

Soient  $p_i^1$  et  $p_i^2$  les valeurs du gène  $i$  pour les deux parents, et  $d_i^1$  et  $d_i^2$  celles des descendants. Les descendants sont alors définis par :

$$d_i^1 = \frac{1}{2} [(1 - \beta) \cdot p_i^1 + (1 + \beta) \cdot p_i^2], \quad d_i^2 = \frac{1}{2} [(1 + \beta) \cdot p_i^1 + (1 - \beta) \cdot p_i^2].$$

Le paramètre par défaut utilisé est  $\eta_x = 5$ .

### 3. Opérateur de mutation :

Chaque individu a une probabilité  $p_m$  de muter. L'opérateur *polynomial mutation* définit la mutation  $g'_i$  d'un gène  $g_i$  d'un individu selon :

$$g'_i = \begin{cases} g_i + \delta_L \cdot (x_i^U - x_i^L), & \text{si } u < 0.5, \\ g_i + \delta_U \cdot (x_i^U - x_i^L), & \text{sinon,} \end{cases}$$

où  $u \sim \mathcal{U}[0, 1]$  suit une loi uniforme, et  $x_i^L, x_i^U$  sont respectivement les bornes inférieure et supérieure du gène  $g_i$ . Les valeurs  $\delta_L$  et  $\delta_U$  sont obtenues via une distribution polynomiale.

Les coefficients  $\delta_L$  et  $\delta_U$  sont calculés à l'aide de la distribution polynomiale selon les formules suivantes :

$$\delta_L = (2u)^{\frac{1}{1+\eta_m}} - 1, \quad \delta_U = 1 - [2(1-u)]^{\frac{1}{1+\eta_m}},$$

où  $\eta_m$  est le paramètre de distribution de la mutation.

Les paramètres par défaut sont :

$$p_m = 0,2 \quad \text{et} \quad \eta_m = 10.$$

## Chapitre 4

# Optimisation du programme de réassurance dans le cadre de l'évaluation ORSA pour un produit d'épargne

### 4.1 Assurance vie épargne

L'assurance vie épargne permet au souscripteur de se constituer progressivement un capital, sur le moyen ou le long terme, grâce à des versements réguliers ou ponctuels. Ce capital peut être transmis à un bénéficiaire librement désigné, y compris le souscripteur lui-même. L'épargne ainsi constituée reste disponible à tout moment et peut être mobilisée pour financer divers projets ou compléter les revenus à la retraite.

On distingue deux cas de figure pour la fin du contrat :

- En cas de vie du souscripteur, il reste bénéficiaire du capital et peut récupérer le montant investi et les intérêts dégagés.
- En cas de décès du souscripteur, le contrat prévoit la transmission du capital au(x) bénéficiaire(s) désigné(s) lors de la souscription (enfants, conjoints, ...)

#### 4.1.1 Les supports d'investissement

Il y a deux types de contrats :

- **Les fonds en euros** : Le capital investi est garanti, ce qui signifie qu'il ne peut pas diminuer en valeur. L'assureur s'engage à revaloriser ce capital chaque année au taux minimum garanti (TMG) et à y ajouter, en fin d'exercice, une participation aux bénéfices (PB). Pour assurer a minima le versement du TMG, les fonds collectés sont investis sur les marchés financiers. Si les rendements générés s'avèrent insuffisants, l'assureur doit puiser dans ses provisions techniques ou ses fonds propres afin d'honorer son engagement de garantie.
- **Les fonds en unités de compte** : Contrairement aux fonds en euros, les unités de compte (UC) ne garantissent pas le capital investi. La seule garantie concerne le nombre de parts acquises : les sommes versées sont converties en parts d'OPCVM (Organismes de Placement Collectif en Valeurs Mobilières), dont le nombre reste constant, mais dont la valeur peut fluctuer. Ces supports, exposés à des niveaux de risque variables, peuvent enregistrer des hausses comme des baisses de valeur. Ainsi, l'assuré s'expose à un risque de perte en capital en cas de dépréciation des parts détenues.

## 4.1.2 Les risques majeurs liés à l'activité épargne

### 4.1.2.1 Risque action et immobilier

Le risque action et le risque immobilier représentent les menaces liées aux fluctuations de valeur et de volatilité des marchés actions et immobiliers. Ces risques sont incontournables pour les assureurs qui détiennent généralement un portefeuille d'investissements diversifié. En cas de dépréciation importante des marchés actions ou immobiliers, l'assureur peut se retrouver confronté à un dilemme : il pourrait ne plus être en mesure d'offrir une revalorisation satisfaisante des contrats à ses assurés. Face à cette situation, l'assureur serait contraint soit de réduire sa marge bénéficiaire, soit de liquider certains actifs même si ceux-ci présentent des moins-values latentes, détériorant davantage sa situation financière.

### 4.1.2.2 Risque de taux

Le risque de taux d'intérêt affecte l'assureur à travers ses actifs et passifs dont la valeur fluctue selon l'évolution de la courbe des taux. Les compagnies d'assurance, investissant majoritairement dans des produits obligataires, sont particulièrement vulnérables à ce risque, qui se manifeste de deux façons principales :

- En période de hausse des taux, l'assureur peut faire face à une augmentation des rachats conjoncturels. Ce phénomène s'explique par l'écart des taux servis qui se crée entre les anciens contrats et les nouvelles offres du marché. Les assurés, attirés par des taux plus

avantageux chez les concurrents, peuvent décider de transférer leur épargne, provoquant des sorties de fonds imprévues pour l'assureur.

- À l'inverse, une baisse des taux entraîne une appréciation de la valeur de marché des obligations détenues, améliorant temporairement la situation bilancielle. Cependant, cette situation engendre une détérioration progressive du rendement du portefeuille, les nouveaux investissements offrant des rendements inférieurs. L'assureur se retrouve alors pris entre des engagements contractuels (notamment les Taux Minimums Garantis) devenus difficiles à honorer et la diminution des revenus financiers. Pour faire face à cette situation, l'assureur peut être contraint de réduire sa marge ou de liquider des actifs, parfois en situation de moins-value, compromettant davantage sa stabilité financière.

#### 4.1.2.3 Le risque de rachat

Les contrats d'épargne en assurance-vie offrent généralement une option de rachat partiel ou total, exposant les assureurs à un risque significatif lié au comportement des épargnants. Le risque rachat se manifeste sous deux formes distinctes :

- **Les rachats conjoncturels** sont déterminés par l'environnement économique et les performances relatives de l'assureur. Ils surviennent principalement lorsque les taux servis par l'assureur deviennent moins attractifs que ceux proposés par ses concurrents, incitant les assurés à transférer leurs fonds.
- **Les rachats structurels** sont liés aux caractéristiques intrinsèques des contrats ou au profil des assurés. Un exemple typique est l'augmentation des rachats après huit ans de détention, période à partir de laquelle la fiscalité de l'assurance-vie devient particulièrement avantageuse. Ces rachats sont généralement anticipés grâce à l'analyse des données historiques de l'assureur.

L'allocation d'actifs d'un assureur est stratégiquement déterminée en fonction des caractéristiques de son passif, notamment la durée et les taux minimums garantis. Lorsque les rachats réels dépassent les prévisions, l'assureur peut se retrouver contraint de céder prématurément certains actifs pour répondre aux besoins de liquidité. Cette situation devient particulièrement préjudiciable si ces actifs présentent des moins-values latentes. La modélisation précise du comportement des assurés constitue donc un enjeu fondamental pour la gestion actif-passif des compagnies d'assurance, influençant directement leur stabilité financière et leur valorisation.

## 4.2 Présentation et caractéristiques du produit

- **Line of business** : Épargne par capitalisation.

- **Garantie en cas de vie du souscripteur assuré au terme** : constitution d'une épargne au terme par capitalisation et revalorisation soit des primes initiales et complémentaires par le biais des participation aux bénéfices (le TMG pour ce produit est nul) servie sous forme de capital et/ou de rente certaine.
- **Garantie en cas de Décès du souscripteur assuré avant le terme** : L'épargne constituée est versée sous forme de capital aux bénéficiaires ou, à défaut, aux ayants droit.
- **Frais et charges** : Les frais d'acquisition sont prélevés en une seule fois sur le montant de chaque prime, initiale ou complémentaire, soit à la date de souscription du contrat, soit au moment du paiement de la prime complémentaire. Et les frais de gestion sont prélevés sur le montant du capital constitué, à la clôture de chaque exercice, lors de l'établissement du compte de participation aux bénéfices.
- **Rachat total** : Si la durée du contrat est inférieure à trois ans, la pénalité de rachat s'élève à 2 % de l'épargne constituée. Au-delà de la troisième année d'assurance, cette pénalité est nulle.
- **Rachat partiel** : Le souscripteur assuré peut effectuer un rachat partiel dans les mêmes conditions que pour un rachat total. À chaque demande, le montant du rachat ne peut excéder 50 % de la valeur de l'épargne constituée.
- **Avance** L'assureur peut accorder une avance dont le montant ne dépasse pas 80 % de la valeur de rachat nette d'impôts. Cette avance est consentie pour une durée maximale de cinq ans ; au-delà, elle est considérée comme un rachat partiel du contrat.
- **Nantissement du capital constitué** : Le capital constitué est affecté en garantie des éventuelles créances du créancier. Par conséquent, le souscripteur assuré ne peut ni bénéficier d'avances ou de rachats liés à son contrat, ni procéder à la liquidation de son capital à l'échéance sans l'autorisation préalable du créancier. En cas d'exigibilité des créances, il consent dès à présent à ce que le capital qui lui est dû par l'assureur soit versé, même en son absence et sans son accord, au créancier, dans la limite du montant de la créance, laquelle ne peut excéder la valeur de rachat.

## 4.3 Gestion Actif / Passif

### 4.3.1 Hypothèses de projection du bilan prudentiel & business plan

Les hypothèses sont définies comme suit :

- Les passifs seront projetés en new business, c'est à dire que la compagnie émet de nouveaux contrats. Donc les primes futures déjà prévues pour les assurés existants et les

primes des nouveaux souscripteurs sont prises en compte dans les projections

- Horizon de projection est de 5 ans
- Les prestations prises en compte comprennent les rachats, qu'ils soient totaux ou partiels, ainsi que les décès, déterminés à partir de la table de mortalité TD88-90, on suppose qu'ils ont lieu en fin d'année.
- La participation aux bénéficiaires est de 85%
- Les polices d'assurances sont regroupées en groupes homogènes (model points) selon l'âge et l'ancienneté
- La courbe des taux utilisée pour la projection des passifs est la courbe zéro-coupon déterminée selon l'approche Bottom-up
- L'allocation des actifs est considérée constante sur l'horizon de projection (5 ans)
- les actifs sont infiniment divisibles
- Le portefeuille des actifs sera principalement constitué d'actions(30%), d'obligations(50%), d'immobilier(15%) et monétaire(5%).
- Le marché est supposé liquide
- Il n'y a aucun coût de transaction

### 4.3.2 Modèle ALM

La gestion actif-passif (ALM) constitue une approche stratégique essentielle pour les compagnies d'assurance, notamment dans le domaine de l'assurance vie, où elle vise à harmoniser les flux financiers des actifs et des passifs afin de garantir la solvabilité et la rentabilité à long terme. Cette méthode repose sur la modélisation prospective du bilan, intégrant des projections de flux de trésorerie tant pour les actifs, tels que les revenus d'intérêts et les remboursements d'obligations, que pour les passifs, incluant les engagements envers les assurés. L'objectif est de prévenir les déséquilibres financiers, qui peuvent survenir en raison de divergences de maturité, de taux d'intérêt ou de devises entre les actifs et les passifs. En assurance vie, la complexité est accrue par la nécessité de prendre en compte des facteurs tels que les comportements des assurés, les taux de rachat et les options contractuelles, ce qui requiert l'utilisation de modèles sophistiqués, souvent stochastiques, pour simuler divers scénarios économiques et évaluer les risques associés.

Le modèle ALM se déroule selon les étapes suivantes :

- Vieillessement du passif
- Vieillessement de l'actif
- Calcul des encaissements et des décaissements
- Réallocation des actifs

- Revalorisation des contrats
- Construction du compte de résultats et du bilan

Le bilan de départ est donné comme suit :

**TABLE 4.1** – Bilan de départ

	<b>2022</b>
Actions	63 321 937
Obligations	105 536 561
Immobilier	31 660 968
Monétaire	10 553 656
<b>Total Actifs</b>	<b>211 073 122</b>
Provisions mathématiques (PM)	196 091 715
Réserves de capitalisation	0
Fonds propres	9 804 585.8
Participation aux bénéfices (PB)	5 176 821.3
<b>Total Passifs</b>	<b>211 073 122</b>

### 4.3.3 Vieillessement du passif

Le vieillissement du passif en assurance vie consiste à modéliser l'évolution des engagements futurs d'un portefeuille, en tenant compte des flux financiers associés aux prestations, aux frais et aux provisions techniques. Ce processus implique l'estimation des sorties de trésorerie liées aux rachats, aux décès, à la participation aux bénéfices, ainsi qu'aux frais de gestion, d'acquisition et de placement.

Parallèlement, elle implique l'évaluation des variations des provisions mathématiques et des autres engagements techniques, en intégrant les interactions complexes entre l'actif et le passif, notamment pour la détermination de la participation aux bénéfices.

#### 4.3.3.1 Prestation rachat

Dans le produit étudié, le montant de rachat est soumis à une pénalité de 2% à partir de la troisième année d'ancienneté du contrat. Ainsi, le rachat intervient lorsque l'assuré est encore

en vie, et son montant est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Prestation}_{\text{Rachat}}(t) = \begin{cases} (1 - q_{x+t}) \cdot TR(a+t) \cdot PM(t-1) \cdot (1 - 0,02) & \text{si ancienneté} \leq 3 \\ (1 - q_{x+t}) \cdot TR(a+t) \cdot PM(t-1) & \text{si ancienneté} > 3 \end{cases}$$

où :

- $TR(a)$  : taux de rachat selon l'ancienneté  $a$ ,
- $q_x$  : probabilité de décès à l'âge  $x$ ,
- $t$  : année de projection.

**TABLE 4.2** – Projection des prestations rachat

2023	2024	2025	2026	2027
19 289 950	20 900 267	21 413 148	20 788 727	20 147 661

#### 4.3.3.2 Prestation décès

La prestation décès est calculée sur la base de la table de mortalité TD88-90, selon la formule suivante :

$$\text{Prestation}_{\text{décès}}(t) = q_{x+t} \cdot PM(t-1)$$

**TABLE 4.3** – Projection des prestations décès

2023	2024	2025	2026	2027
4 780 776	11 763 857	19 910 211	27 462 195	34 609 271

#### 4.3.3.3 Frais et chargements

- **Frais sur encours** : Les frais encours représentent les montants retenus par l'assureur pour couvrir les dépenses liées à la gestion du contrat. Ils sont prélevés directement sur

l'épargne constituée chaque année :

$$\text{Frais sur encours}(t) = \text{Taux}_{\text{Frais sur encours}} \cdot PM(t - 1)$$

2023	2024	2025	2026	2027
1 487 791	1 625 858	1 700 830	1 683 868	1 622 879

- **Le coût moyen** : Les frais de gestion en assurance vie sont des prélèvements annuels effectués par l'assureur pour rémunérer la gestion du contrat.

$$\text{Coût moyen} = NB_{\text{polices}} \cdot \text{coût moyen par contrat}$$

2023	2024	2025	2026	2027
21 334.32	21 761.01	22 196.23	22 640.15	23 092.95

- **Frais d'acquisition** : Les frais d'acquisition en assurance vie, également appelés frais sur versement ou frais d'entrée, sont des commissions prélevées par l'assureur lors de chaque versement effectué sur le contrat, qu'il s'agisse du versement initial ou de versements complémentaires :

$$\text{Frais d'acquisition}(t) = \text{Taux}_{\text{Frais d'acquisition}} \cdot \text{Prime}(t)$$

	2023	2024	2025	2026	2027
Frais_acquisition	210 419	196 686.8	183 017.4	165 036.6	141 791.3

#### 4.3.3.4 Provision pour participation aux bénéfices

La provision pour participation aux bénéfices représente les montants issus des résultats techniques et financiers qui reviennent aux assurés, mais dont le versement est différé au-delà de

l'exercice au cours duquel ces résultats ont été générés. Conformément à la réglementation de l'ACAPS, les assurés doivent bénéficier d'au moins 70 % des bénéfices réalisés. Les sommes ainsi mises en provision peuvent, dans un délai maximum de six exercices, être soit incorporées à la provision mathématique, soit créditées sur des comptes individuels, soit versées directement aux souscripteurs.

Selon la circulaire de l'ACAPS, la provision pour participation aux bénéfices est déterminée comme suit :

$$\text{BDF} = \text{PPB} + t_{\text{PB}} \times \max(0, E_T + E_F)$$

- **PPB** : montant de la provision pour participation aux bénéfices, évaluée à la valeur comptable ;
- $t_{\text{PB}}$  : taux moyen de participation aux bénéfices servi aux assurés ;
- $E_T$  : écart technique de valorisation ;
- $E_F$  : écart financier de valorisation.

#### 4.3.3.5 Provision mathématique

A la fin de chaque année de projection, la provision mathématique de clôture est calculée de comme suit :

$$\begin{aligned} PM(t) &= PM(t-1) \\ &+ \text{Primes}(t) \\ &- \text{Prestation}_{\text{décès}}(t) \\ &- \text{Prestation}_{\text{rachat}}(t) \\ &- \text{Chargements}(t) \\ &+ PB(t-n) \cdot \mathbf{1}_{\{n \in [1,6]\}} \end{aligned}$$

$n$  correspond à la période prise en compte par la compagnie pour la distribution des provisions pour participation aux bénéfices, celle-ci ne doit pas, réglementairement, excéder 6 ans. Dans notre cas, nous avons considéré que les provisions pour participation aux bénéfices sont distribuées tous les 3 ans.

Le graphique présenté ci-dessus illustre l'évolution des provisions mathématiques tout au long de l'horizon de projection :

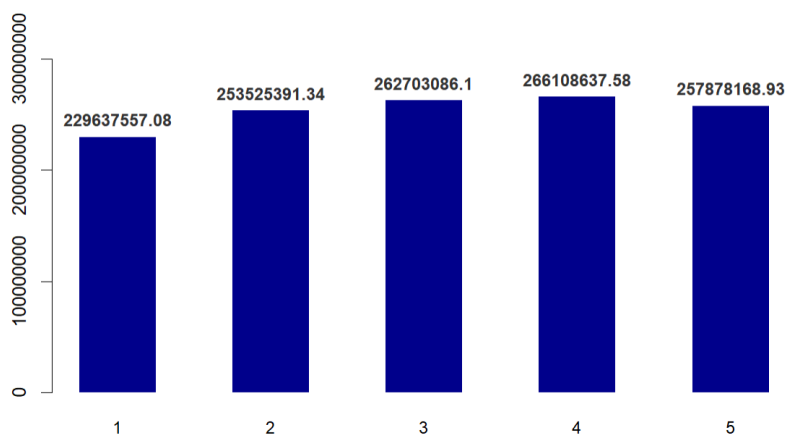


FIGURE 4.1 – Evolution des provisions mathématiques

#### 4.3.3.6 Fonds propres

A la clôture d'un exercice, les fonds propres d'un assureur se composent du capital social, des réserves correspondant aux bénéfices non distribués des exercices précédents et du résultat de l'exercice.

En considérant que tous les bénéfices réalisés chaque année sont réintégrés dans les fonds propres :

$$FP_t = FP_{t-1} + R_t$$

#### 4.3.3.7 Réserve de capitalisation

La réserve de capitalisation est une provision comptable utilisée par les compagnies d'assurance pour lisser les résultats financiers liés aux placements obligataires. Elle est alimentée par les plus-values réalisées lors de la cession d'obligations et utilisée pour compenser les moins-values sur des cessions similaires. Ce mécanisme permet de stabiliser le rendement des contrats d'assurance en évitant que les fluctuations du marché obligataire n'affectent directement les résultats de l'entreprise. Il est important de noter que cette réserve ne peut pas être négative ; si les moins-values dépassent le montant disponible dans la réserve, l'excédent est comptabilisé comme une perte dans le résultat de l'entreprise.

#### 4.3.4 Vieillessement de l'actif

Le vieillissement de l'actif consiste à réévaluer annuellement la valeur de marché des différentes classes d'actifs détenues notamment les actions, les obligations, l'immobilier et le monétaire. Ce processus permet également de déterminer les revenus financiers générés au cours de l'exercice, tels que les dividendes, les coupons obligataires et les intérêts sur placements monétaires.

#### 4.3.4.1 Modélisation des obligations : Modèle de Vasicek

Pour modéliser la courbe des taux zéro-coupon, il est souvent suffisant de considérer un seul facteur de risque : le taux d'intérêt court terme  $r(t)$ . C'est sur cette hypothèse que repose le modèle proposé par Vasicek. En supposant que toute la dynamique des taux est gouvernée uniquement par ce taux instantané, on peut décrire l'évolution des prix des obligations zéro-coupon sans introduire d'autres paramètres.

Ce type d'approche s'inscrit dans la famille des modèles à un facteur, caractérisés par une unique équation stochastique qui encapsule toute l'incertitude du système. Leur simplicité conceptuelle est un atout : avec un seul moteur aléatoire, ils parviennent à générer l'ensemble de la structure des taux en fonction du temps, sans recours à des variables supplémentaires.

Les obligations doivent être valorisées sur la base de leur valeur de marché, déterminée à l'aide d'un modèle d'évaluation des flux futurs actualisés, communément admis, en s'appuyant sur la courbe des taux de référence publiée quotidiennement par Bank Al-Maghrib, et en tenant compte, le cas échéant, de la prime de risque associée.

On se place sur un espace de probabilité  $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$  muni d'une filtration  $(\mathcal{F}_t)_{0 \leq t \leq T}$ . On suppose que sous une probabilité risque-neutre  $\mathbb{Q}$ , le taux court instantané  $r$  suit un processus d'Ornstein-Uhlenbeck à coefficients constants :

$$\begin{cases} dr_t = a(b - r_t) dt + \sigma dW_t, \\ r(0) = r_0, \quad \mathbb{Q}\text{-p.s.} \end{cases}$$

Avec :

- $r_t$  : Taux d'intérêt réel à court terme à l'instant  $t$ . Il évolue de manière aléatoire, mais tend à revenir vers une valeur moyenne à long terme.
- $b$  : Taux moyen à long terme vers lequel le taux  $r_t$  converge.
- $a$  : Vitesse de retour à la moyenne. Elle détermine la rapidité avec laquelle le taux  $r_t$  revient vers  $b$ .
- $\sigma$  : Volatilité instantanée du taux d'intérêt. Elle mesure l'amplitude des fluctuations aléatoires du taux.
- $W_t$  : Mouvement brownien standard représentant le facteur de risque aléatoire du marché.

Pour déterminer l'expression explicite de  $r_t$  dans ce modèle on applique le lemme d'Itô à la fonction  $f(t, r_t) = r_t e^{at}$ , on obtient :

$$d(e^{at}r_t) = e^{at} dr_t + ae^{at}r_t dt = abe^{at} dt + e^{at} dW_t$$

La solution explicite, pour tout  $s \leq t$ , est :

$$r_t = e^{-a(t-s)}r_s + b(1 - e^{-a(t-s)}) + \sigma \int_s^t e^{-a(t-u)} dW_u$$

L'intégrale stochastique  $\int_s^t e^{-\kappa(t-u)} dW_u$  est, conditionnellement à  $\mathcal{F}_s$ , une martingale gaussienne, et  $r(t)$  est distribuée normalement conditionnellement à  $\mathcal{F}_s$ , avec  $s < t$ , de moyenne et variance données par :

- **Espérance :**

En exploitant la linéarité de l'espérance on obtient :

$$\mathbb{E}^{\mathbb{Q}}[r_t | \mathcal{F}_s] = r_s e^{-a(t-s)} + b(1 - e^{-a(t-s)}),$$

Cette expression montre que le taux converge vers une moyenne de long terme donnée par le paramètre  $b$ . En effet :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbb{E}[r_t] = b$$

- **Variance :**

En utilisant la propriété  $\text{Var}(aX + b) = a^2 \text{Var}(X)$  on obtient :

$$\text{Var}^{\mathbb{Q}}[r_t | \mathcal{F}_s] = \frac{\sigma^2}{2a} (1 - e^{-2a(t-s)}).$$

Cette expression met en évidence que la variance du taux croît au début, puis se stabilise asymptotiquement.

À partir de la solution explicite du modèle de Vasicek, et en utilisant les propriétés d'intégration d'une fonction déterministe par rapport à un mouvement brownien, on obtient la discrétisation exacte suivante :

$$r_{t+\delta} = e^{-a\delta}r_t + b(1 - e^{-a\delta}) + \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2a\delta}}{2a}} \cdot W_1$$

où  $W_1 \sim \mathcal{N}(0, 1)$ .

Dans le cadre de notre étude, nous avons opté pour le taux moyen pondéré (TMP) journalier en tant que taux d'intérêt à court terme. Ce taux, représentatif du marché monétaire, correspond

à un taux journalier calculé comme la moyenne pondérée par les montants des transactions effectuées entre établissements bancaires sur le marché interbancaire.

Afin de calibrer notre modèle, nous utiliserons les taux TMP journaliers sur la période allant de 2012 à 2025.

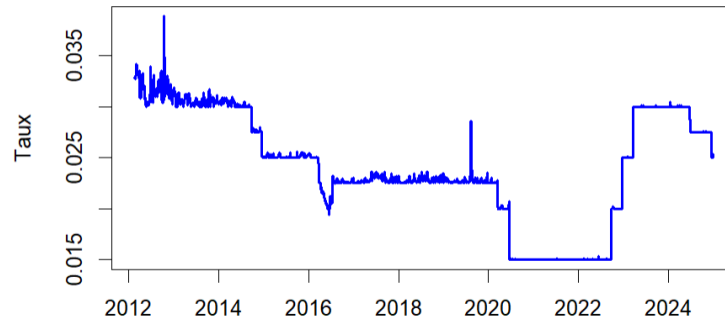


FIGURE 4.2 – Taux moyen pondéré de 2012 a 2025

L'approche du maximum de vraisemblance nous a permis d'estimer les paramètres du modèle comme suit :

<b>a</b>	0,101020939
<b>b</b>	0,024163167
<b><math>\sigma</math></b>	0,001041412

TABLE 4.4 – Estimation des paramètres du modèle de taux court

En se basant sur les paramètres estimés, nous implémentons le modèle afin de simuler 500 trajectoires du taux court :

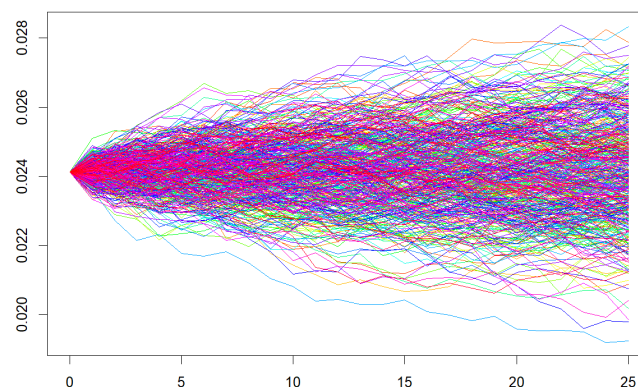


FIGURE 4.3 – Simulation du taux vasicek

La modélisation stochastique de la courbe des taux zéro-coupon repose sur celle des taux d'intérêt, en particulier sur la modélisation des taux courts. L'objectif est d'obtenir une formule explicite pour le prix des obligations zéro-coupon, puis d'extraire le rendement.

On calculera le prix du zéro-coupon en supposant que l'hypothèse (AOA) est vérifiée, et dans le cas où  $\lambda$ , la prime de risque, qui est destinée à couvrir les frais de couverture et à compenser les risques liés à l'incertitude sur l'évolution du taux sans risque, est constant. On pose alors :

$$b^* = b - \lambda \frac{\sigma}{a} \quad \text{et} \quad \widetilde{W}_t = W_t + \lambda t$$

On aura :

$$dr_t = a(b^* - r_t) dt + \sigma d\widetilde{W}_t$$

À présent, l'expression de  $r$  étant établie, il s'agit de l'intégrer dans la formule des prix des obligations zéro-coupon. En considérant l'information  $\mathcal{F}_t$  disponible à la date  $t$ , le prix  $B_T(t, r)$  s'écrit :

$$P_T(t, r) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[ \exp \left( - \int_t^T r(u) du \right) \middle| \mathcal{F}_t \right]$$

On établira par la suite (la démonstration est dans l'annexe, voir section 5.2) que le prix de l'obligation zéro-coupon s'exprime comme suit :

$$P(t, T) = A(t, T) e^{-B(t, T) r_t}$$

Où  $A(t, T)$  et  $B(t, T)$  sont des fonctions des paramètres du modèle.

$$B(t, T) = \frac{1}{a} (1 - e^{-a(T-t)})$$

$$A(t, T) = \exp \left\{ \left( b^* - \frac{\sigma^2}{2a^2} \right) (B(t, T) - (T - t)) - \frac{\sigma^2}{4a} B^2(t, T) \right\}$$

Nous pouvons extraire l'expression du taux zéro-coupon pour la maturité  $T$  à la date  $t$ , noté  $R(t, T)$ , comme suit :

$$R(t, T) = -\frac{1}{T-t} \ln(P(t, T)) = -\frac{1}{T-t} \ln(A(t, T)) - \frac{1}{T-t} B(t, T) \cdot r(t)$$

D'où :

$$R(t, T) = \ell + (r(t) - \ell) \cdot \frac{1 - e^{-a(T-t)}}{a(T-t)} + \frac{\sigma^2}{4a^3(T-t)} (1 - e^{-a(T-t)})^2$$

où :

$$\ell = b^* - \frac{\sigma^2}{2a^2}$$

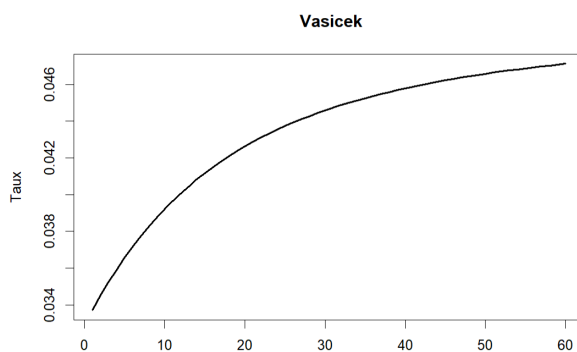
Donc, pour déterminer la courbe des taux zéro-coupon, il est nécessaire d'estimer  $\lambda$

Pour procéder à cette estimation, nous cherchons le paramètre  $\lambda$  qui permet de reconstituer les taux zéro-coupon fournis par l'ACAPS, en minimisant l'écart quadratique entre les taux fournis par l'ACAPS et les taux théoriques obtenus à partir du modèle de Vasicek.

$$\lambda = \arg \min |R_{ACAPS} - R_{Vasicek}|^2$$

On obtient que  $\lambda = 2,5033$ .

Et la courbe des taux de vasicek obtenue est donc :



**FIGURE 4.4** – La courbe des taux

**Taux forward :** Les taux forward jouent un rôle central dans les stratégies d'investissement ou de désinvestissement anticipées, car ils reflètent les rendements attendus d'opérations financières programmées à des dates futures. Il s'agit d'un taux de placement ou d'emprunt fixé aujourd'hui, mais dont l'application concerne une période commençant à une date ultérieure et couvrant une maturité déterminée.

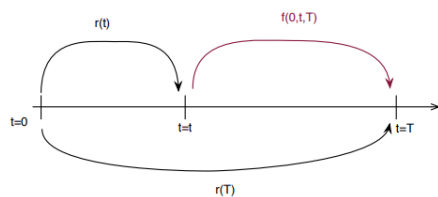


FIGURE 4.5 – Illustration du taux forward

Considérons un contrat à terme par lequel le vendeur s'engage à prêter 1 MAD à l'acheteur à un taux  $f$ , pour une durée de  $n$  années à compter de  $m$  années dans le futur.

À la date initiale  $t = 0$ , le vendeur met en place la stratégie de couverture suivante :

- Emprunt de 1 MAD pour une durée de  $n + m$  années au taux  $r_e$ ,
- Placement du même montant pendant  $m$  années au taux  $r_p$ .

En l'absence d'opportunité d'arbitrage, la condition d'équilibre est :

$$(1 + r_e)^{n+m} = (1 + r_p)^m \cdot (1 + f)^n$$

On en déduit la formule du taux forward :

$$f = \left( \frac{(1 + r_e)^{n+m}}{(1 + r_p)^m} \right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

L'équation précédente montre que les taux forward peuvent être implicites grâce aux taux ZC.

Par la suite on peut trouver la valeur de marché des obligations en actualisant les flux futurs à l'aide des taux zéro-coupon. Ces flux futurs comprennent les paiements des coupons ainsi que le remboursement du nominal. La valeur de marché à la date  $t$  est donnée par la formule suivante :

$$VM(t) = \sum_{i=1}^{T-t} \frac{c \times N}{(1 + R(t, t + i))^i} + \frac{N}{(1 + R(t, T))^{T-t}}$$

Où :

- $N$  est le nominal de l'obligation
- $T$  est la maturité de l'obligation
- $c$  est le taux de coupon de l'obligation
- $R(t, t + i)$  est le taux zéro-coupon à la date  $t$  et à la maturité  $t + i$

#### 4.3.4.2 Modélisation du cours des actions et immobiliers : Modèle de Black & Scholes

Dans le cadre du modèle de Black & Scholes, la dynamique du prix de l'action  $S_t$  est décrite par l'équation différentielle suivante :

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t$$

Où :

- $W_t$  est un mouvement brownien standard,
- $\mu$  représente la moyenne des rendements des actions,
- $\sigma$  est l'écart type des rendements des actions.

En appliquant le lemme d'Ito à la fonction  $f(x) = \ln(x)$ , on obtient la solution pour le prix de l'action à l'instant  $t + 1$ ) :

$$S_{t+1} = S_t \exp \left[ \left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) + \sigma W_1 \right]$$

Où  $\delta$  représente le pas de discrétisation.

Le rendement du fonds d'actions sur la période  $]t, t + \delta]$  est alors donné par :

$$r_t = \ln \left( \frac{S_{t+1}}{S_t} \right) = \left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) + \sigma W_1$$

Sous la probabilité historique, le rendement  $r_t$  suit une loi normale :

$$r_t \sim \mathcal{N} \left( \left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right), \sigma^2 \right)$$

On estime la moyenne  $\left( \mu - \frac{\sigma^2}{2} \right)$  par la moyenne empirique, et la variance  $\sigma^2$  par la variance empirique et on peut par la suite déduire  $\hat{\mu}$  et  $\hat{\sigma}$  :

$$\hat{\mu} = \bar{r} + \frac{\hat{\sigma}^2}{2}$$

et

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (r_t - \bar{r})^2$$

où  $\bar{r}$  est la moyenne empirique des rendements et  $\hat{\sigma}^2$  est l'estimation de la variance.

Afin de simuler l'évolution de ces actifs, nous avons utilisé l'indice MASI comme proxy pour le marché actions, et l'indice des prix de l'immobilier (IPA) pour représenter le secteur immobilier.

## Résultat

### 1. Vérification de l'hypothèse de normalité des rendements historiques

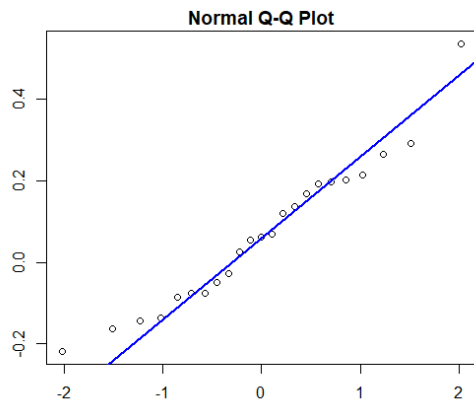


FIGURE 4.6 – QQ-plot des rendements-actions

```
> shapiro.test(rt)

      Shapiro-Wilk normality test

data:  rt
W = 0.96066, p-value = 0.4768

> jarque.bera.test(rt)

      Jarque Bera Test

data:  rt
X-squared = 1.1176, df = 2, p-value = 0.5719
```

FIGURE 4.7 – Tests de normalité des rendements

Les p-values des deux tests affichent des valeurs largement supérieures à 5%, d'où la normalité des rendements.

### 2. Simulation des prix des actions

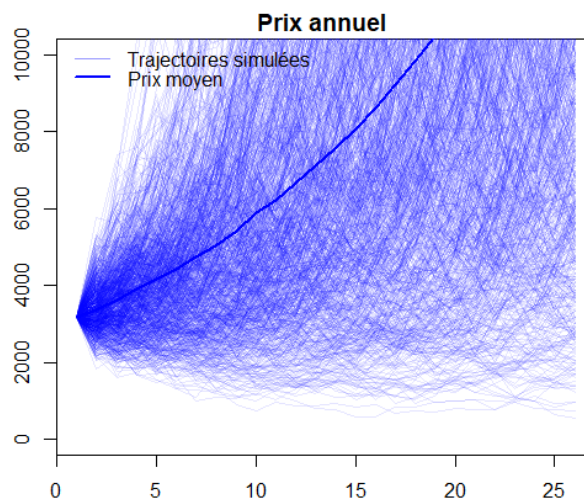


FIGURE 4.8 – Simulation des prix des actions

Par la suite on peut trouver la valeur de marché concernant les actifs actions et immobiliers comme suit :

$$VM(t) = VC(t) \times (1 + rendement_t)$$

#### 4.3.4.3 Flux monétaires

Le rendement du monétaire est indexé sur le taux sans risque :

$$\text{Flux monetaire}(t) = VM_{t-1} \times \text{Taux sans risque}(t)$$

#### 4.3.5 Encaissements et décaissements de la trésorerie

Il s'agit d'établir l'assiette de trésorerie initiale pour l'année de projection, en recensant l'ensemble des flux financiers survenus en tout début d'exercice, tant du côté actif que passif. Elle intègre principalement les revenus générés par les placements, les encaissements issus du remboursement des titres arrivés à échéance, ainsi que les décaissements relatifs aux prestations versées. Le flux de trésorerie est déterminé en faisant la différence entre l'ensemble des encaissements et des décaissements puis le solde de trésorerie est entièrement absorbé par les actifs monétaires.

#### 4.3.6 Réallocation des actifs

La revalorisation des provisions mathématiques et la gestion des prestations ont un impact direct sur la structure de l'actif. La valeur de marché des actions est affectée par la réalisation de plus-values latentes lors de la phase de revalorisation. De même, l'actif monétaire, représentant la trésorerie de la société, est influencé par les flux de liquidités entrants et sortants, tels que les ventes d'actions, les prestations liées aux décès, les rachats et les frais administratifs. À cette étape, la valeur de l'actif monétaire peut être positive ou négative, selon que les flux entrants excèdent ou non les flux sortants. Cette dynamique est essentielle pour la réallocation stratégique du portefeuille financier.

#### 4.3.7 Bilan Actif-Passif

Après application du modèle ALM, les résultats obtenus se récapitulent dans le bilan suivant :

**TABLE 4.5** – Bilan Actif-Passif

	2023	2024	2025	2026	2027
Action	75 060 653	82 000 639	87 180 096	87 760 937	86 426 841
Obligation	126 530 431	145 161 905	156 771 423	163 866 675	162 892 741
Immobilier	39 473 728	44 529,641	47 519 363	49 237 477	48 713 585
Monétaire	13 157 384	14 868 196	15 870 503	16 455 299	16 289 274
<b>Total actifs</b>	<b>254 222 196</b>	<b>286 560 381</b>	<b>307 341 384</b>	<b>317 320 388</b>	<b>314 322 441</b>
PM	229 637 557	253 525 391	262 703 086	266 108 638	257 878 169
Reserves de capitalisation	296 597.7	489 325.7	651 178.1	714 868.5	714 868.5
Fonds propres	12 805 791	16 252 280	19 973 498	23 980 574	28 021 157
PB	11 482 250	16 293 384	24 013 623	26 516 308	27 708 247
<b>Total passifs</b>	<b>254 222 196</b>	<b>286 560 381</b>	<b>307 341 384</b>	<b>317 320 388</b>	<b>314 322 441</b>

### 4.3.8 Compte de résultat

La réglementation comptable du secteur assurantiel impose aux organismes d'établir des comptes de résultat technique avant de consolider leurs données dans le compte de résultat global. Cette approche vise à séparer clairement les activités purement assurantielles des autres opérations, ces comptes techniques constituent en l'indicateur de la performance technique et financière des organismes sur leurs opérations d'assurance .

En assurance-vie, le compte de résultat technique se structure en 4 sous comptes :

- Solde de souscription (net des charges d'acquisition et de gestion)
- Solde financier
- Participation aux résultats
- Solde de réassurance

**TABLE 4.6** – Compte de résultat

	2023	2024	2025	2026	2027
Primes	56 870 000	53 158 596	49 464 162	44 604 477	38 321 968
Décès	-4 780 776	-11 763 857	-19 910 211	-27 462 195	-34 609 271
Rachat	-19 289 950	-20 900 267	-21 413 148	-20 788 727	-20 147 661
Réassurance	0	0	0	0	0
Pénalité de rachat	393 672.5	317 302.4	217 028.5	94 433.55	0
Variation des PM	23 324 158	29 270 762	40 286 467	41 198 925	46 552 467
Participation aux bénéficiaires	-6 305 429	-4 811 103	-7 720 280	-2 502 757	-1 192 264
Reserve de capitalisation	-296 503.7	-192 811.1	-161 952.9	-63 830.28	0
Frais sur encours	1 487 791	1 625 858	1 700 830	1 683 868	1 622 879
Frais d'acquisition	-210 419	-196 686.8	-183 017.4	-165 036.6	-141 791.3
Frais de gestion	-21 334.320	-21 761.01	-22 196.230	-22 640.15	-23 092.95
Frais des placements	-113 875.8	-129 966.7	-142 037.5	-148 867.9	-150 328.3
Produits des placements	8 700 621	10 176 812	10 941 802	12 049 492	11 987 946
PMVL sur obligations réalisées	296 503.7	192 811.1	161 952.9	63 830.28	0
<b>Résultat</b>	<b>60 054 458</b>	<b>56 725 689</b>	<b>53 219 401</b>	<b>48 540 972</b>	<b>42 220 850</b>

## 4.4 Projection des éléments du pilier 1 de la norme SBR

### 4.4.1 Projection du Capital de Solvabilité Requis (SCR)

#### 4.4.1.1 Projection du SCR marché

Le calcul du SCR relatif au risque du marché implique la détermination des SCR relatifs associés aux sous-risques actions, taux, immobilier, spread et change, en tenant compte de leurs corrélations.

$$SCR_{\text{marché}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n SCR_i \cdot SCR_j \cdot \rho_{i,j}}$$

où :

- $SCR_i$  et  $SCR_j$  représentent les capital requis pour les sous-risques  $i$  et  $j$ ,
- $\rho_{i,j}$  est le coefficient de corrélation entre les sous-risques  $i$  et  $j$ ,
- $n = 5$ , correspondant aux sous-risques du marché : actions, taux, immobilier, spread et change.

Ci-après est présentée la matrice de corrélation fournie par l'ACAPS.

**TABLE 4.7** – Matrice de corrélation entre les sous-risques du module de risque de marché

	$CSR_{\text{action}}$	$CSR_{\text{taux}}$	$CSR_{\text{immobilier}}$	$CSR_{\text{écart de taux}}$	$CSR_{\text{change}}$
$CSR_{\text{action}}$	1	0,25	0,25	0,25	0,25
$CSR_{\text{taux}}$	0,25	1	0,25	0	0,25
$CSR_{\text{immobilier}}$	0,25	0,25	1	0	0,25
$CSR_{\text{écart de taux}}$	0,25	0	0	1	0,25
$CSR_{\text{change}}$	0,25	0,25	0,25	0,25	1

Il est à noter que le risque de change n'est pas applicable à notre produit, car tous les flux financiers sont exprimés dans une seule devise, le dirham marocain (MAD). Il n'existe donc pas de variation de change susceptible d'impacter la valorisation du SCR.

Nous détaillerons ci-après les formules standard utilisés pour le calcul du SCR de chaque sous-risque, en particulier les chocs définis par la norme SBR.

### 1. SCR actions

Le SCR actions correspond à la différence positive entre les valeurs de marché des actions avant et après le choc.

Pour établir ces chocs, l'autorité de contrôle a utilisé deux approches : une approche par séries temporelles et une autre basée sur la Value at Risk. En effet, on retient la Value at Risk à 99,5% des rendements annuels glissants de l'indice MASI.

### 2. SCR taux

Le SCR taux correspond au maximum entre :

- la différence entre les valeurs du best estimate avant et après choc en cas de hausse de taux.
- la différence entre les valeurs du best estimate avant et après choc en cas de baisse de taux.

Pour calibrer ces chocs, l'autorité de contrôle a réalisé une analyse en composantes principales sur les variations des taux annuels relatifs à des maturités allant de 1 à 15 ans, ainsi qu'à 20 ans. Elle a retenu quatre facteurs principaux pour expliquer les mouvements de la courbe des taux :

- Le facteur de translation (niveau) pour le premier facteur ;
- L'effet de pente pour le deuxième facteur ;
- L'effet de courbure (convexité globale) pour le troisième facteur ;
- L'effet de torsion (convexité locale) pour le quatrième facteur.

Les détails de cette démarche ne sont présentés ici qu'à titre indicatif, et le sont de manière plus approfondie dans la section consacrée aux scénarios de stress, car nous avons procédé de la même façon pour recalibrer le risque de taux.

### 3. SCR spread

SCR spread correspond à la différence positive entre les valeurs des obligation avant et après choc.

Pour calibrer ce choc, l'autorité a utilisé la formule suivante :

$$\text{choc spread} = a_1 + b_1 \times (dur - dur_{min})$$

où  $a_1$  et  $b_1$  sont fonctions de la prime de risque et de la durée. La prime de risque, quant elle, est fonction de la notation de crédit. elle est inférieure à 50 pour les crédits de notation AAA et supérieure à 250 pour ceux de notation moins de BB.

### 4. SCR immobilier

SCR spread correspond à la différence positive entre les valeurs de l'actif immobilier avant et après choc.

Pour le choc immobilier, l'autorité a calculé la Value-at-Risk paramétrique à 99,5% sur les rendements annuels glissants de l'indice des prix des actifs immobiliers (IPAI) de la ville de Casablanca. Ce choix se justifie par le fait qu'environ 70% du portefeuille immobilier des assureurs marocains est localisé dans cette ville.

**TABLE 4.8** – SCRs relatifs aux sous-risques de marché

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR action	4 690 049	2 808 778	1 131 126	205 591	2 033 403
SCR taux	746 568	3 619 512	1 232 753	7 101 467	8 654 889
SCR spread	4 427 561	5 092 640	10 935 542	13 957 732	20 134 550
SCR immobilier	729 643.8	2 857 484	4 418 475	4 947 321	6 257 693

**TABLE 4.9** – Projection du SCR marché

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR marché	7 539 142	8 749 337	12 409 171	17 029 036	24 213 611

#### 4.4.1.2 Projection du SCR souscription vie

Le calcul du SCR relatif au risque de souscription vie implique le calcul des SCR relatifs aux sous-risques de mortalité, de longévité, de rachat, de frais et de catastrophe en tenant compte de leurs corrélations. Ci-après est présentée la matrice de corrélation fournie par l'ACAPS.

**TABLE 4.10** – Matrice de corrélation entre les sous-chocs du module de risque vie

	$CSR_{\text{mortalité}}$	$CSR_{\text{longévité}}$	$CSR_{\text{rachat}}$	$CSR_{\text{frais}}$	$CSR_{\text{cat. vie}}$
$CSR_{\text{mortalité}}$	1	-0,25	0	0,25	0,25
$CSR_{\text{longévité}}$	-0,25	1	0,25	0,25	0
$CSR_{\text{rachat}}$	0	0,25	1	0,5	0,25
$CSR_{\text{frais}}$	0,25	0,25	0,5	1	0,25
$CSR_{\text{cat. vie}}$	0,25	0	0,25	0,25	1

Il est à noter que, selon la norme SBR, les SCR relatifs aux sous-risques de mortalité et de longévité sont considérés comme identiques.

Nous détaillerons ci-après les formules standard utilisés pour le calcul du SCR de chaque sous-risque, en particulier les chocs définis par la norme SBR.

##### 1. SCR mortalité

Le SCR relatif au risque de mortalité correspond à la différence entre la meilleure estimation (BE) après choc et cette même estimation avant choc.

$$SCR_{\text{mortalité}} = BE_{\text{après choc}} - BE_{\text{avant choc}}$$

##### Calibrage du choc mortalité/longévité

Pour calibrer ces chocs, l'autorité a opté pour une base de données comprenant les ratios de  $S/P$  de la branche décès obtenus à partir des données consolidées du marché.

L'exploitation de telles données suppose la validité de deux hypothèses :

- La première est que les variations  $S/P$  de la branche décès suivent une loi normale ;
- Et la deuxième est qu'il existe une forte corrélation entre le taux  $S/P$  et le celui de mortalité.

### Remarque

Dans le but d'éliminer les biais liés aux modifications de produits et à l'évolution des tarifs sur l'historique considéré, les sinistres (S) ont été ajustés en excluant les variations des provisions mathématiques, et les primes (P) corrigées en retirant les frais d'acquisition.

La détermination des chocs se fait ensuite moyennant le calcul du quantile de niveau 99,5% en cas de hausse et 0,5% en cas de baisse.

$$\text{Choc à la hausse} = \frac{\sigma \times q_{99,5\%}(\epsilon)}{\overline{\left(\frac{S}{P}\right)}}$$

$$\text{Choc à la baisse} = \frac{\sigma \times q_{0,5\%}(\epsilon)}{\overline{\left(\frac{S}{P}\right)}}$$

Avec,

- $\overline{\left(\frac{S}{P}\right)}$  est la moyenne empirique des  $\frac{S}{P}$  annuels observés.
- $\epsilon$  est une variable aléatoire suivant une loi normale centrée réduite  $\left(\frac{\left(\frac{S}{P}\right)_t - \left(\frac{S}{P}\right)_{t-1}}{\sigma}\right)$ .
- $q_\alpha(\epsilon)$  est le quantile d'ordre  $\alpha$  de  $\epsilon$ .
- $\sigma$  est l'écart type des variations des  $\frac{S}{P}$  annuels.

## 2. SCR rachat

Le SCR relatif au risque de rachat correspond au maximum entre les cas d'une hausse et d'une baisse des taux de rachat. Chacun de ces scénarios est mesuré par la différence entre la meilleure estimation (BE) après choc et cette même estimation avant choc.

$$SCR_{\text{rachat à la hausse}} = BE_{\text{après choc up}} - BE_{\text{avant choc}}$$

$$SCR_{\text{rachat à la baisse}} = BE_{\text{avant choc}} - BE_{\text{après choc down}}$$

$$SCR_{\text{rachat}} = \max(SCR_{\text{rachat à la baisse}}, SCR_{\text{rachat à la hausse}})$$

où les taux de rachat après un choc à la hausse ( $\text{taux}_{\text{rachUp}}$ ) et à la baisse ( $\text{taux}_{\text{rachDown}}$ ) sont calculés de la manière suivante :

$$\text{taux}_{\text{rachUp}} = \min(\text{taux}_{\text{rachCentral}} \times (1 + \text{chocUp}), 1)$$

$$\text{taux}_{\text{rachDown}} = \max(\text{taux}_{\text{rachCentral}} \times (1 - \text{chocDown}), 0)$$

### Calibrage du choc rachat

Pour le calibrage du choc rachat, on adopte la même démarche que celle utilisée pour

le calibrage du sous-risque mortalité, en l'appliquant à des données comprenant les taux de rachat des catégories épargne/capitalisation calculés en s'appuyant sur des données consolidées du marché.

$$\text{Choc à la hausse} = \frac{\sigma \times q_{99,5\%}(\epsilon)}{\text{taux de rachat}}$$

$$\text{Choc à la baisse} = \frac{\sigma \times q_{0,5\%}(\epsilon)}{\text{taux de rachat}}$$

Avec,

—  $\overline{\text{taux de rachat}}$  est la moyenne empirique des taux de rachat annuels observés.

La validité de cette approche repose sur l'hypothèse selon laquelle les variations des taux de rachat suivent une loi normale.

### 3. SCR frais

Le sous-risque frais, quant à lui, se compose de deux éléments principaux :

- les frais de gestion
- l'inflation

#### (a) Calibrage du sous-risque de frais

Conformément à la méthodologie retenue pour le calibrage des autres sous-risques (tels que la mortalité ou le rachat), le calibrage du sous-risque de frais s'appuie également sur une approche paramétrique, fondée sur l'hypothèse que les variations annuelles du taux de frais de gestion suivent une loi normale.

Les données utilisées à cet effet sont issues du marché consolidé, et concernent les opérations d'assurance vie, décès ou de capitalisation. Le taux de frais de gestion est défini comme le rapport entre le montant des autres charges techniques d'exploitation et le montant des provisions techniques à la clôture.

Le choc à la hausse est ainsi obtenu selon la formule suivante :

$$\text{Choc}_{\text{hausse}} = \frac{\sigma \times q_{99,5\%}(\epsilon)}{\overline{\text{Taux de frais de gestion}}}$$

Avec,

- $\overline{\text{Taux de frais de gestion}}$  est la moyenne empirique des taux de frais de gestion observés.
- $\sigma$  représente l'écart-type des variations annuelles des taux de frais.

#### (b) Calibrage du sous-risque d'inflation

Le calibrage du choc inflation a été réalisé en estimant la moyenne historique des

taux d'inflation.

#### 4. SCR catastrophe vie

Le SCR catastrophe vie mesure le risque de pertes importantes dues à des événements rares mais graves affectant un grand nombre d'assurés, au-delà des chocs de mortalité et longévité standards.

##### Calibrage du choc catastrophe vie

Le calibrage du choc catastrophe-vie a été effectué sur la base d'un jugement d'expert, en l'absence de données spécifiques aux pays émergents. Il s'appuie sur une étude menée par Swiss Re en 2007, qui évalue l'impact d'une pandémie grippale sur la mortalité dans un panel de pays développés à l'aide d'un modèle épidémiologique avancé.

Dans ce cadre, la pandémie de grippe espagnole de 1918, considérée comme un événement extrême avec une fréquence de retour estimée à 1 sur 200 ans, conduit à une VaR à 99,5% d'environ 0,5%.

Compte tenu des progrès médicaux réalisés, notamment dans notre pays, l'ampleur de ce choc sera atténuée.

Les SCR obtenus pour notre produit, relatifs aux différents sous-risques du module de risque de souscription vie sont ainsi récapitulés dans le tableau suivant.

**TABLE 4.11** – SCRs relatifs aux sous-risques de souscription vie

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR mortalité	1 434 233	3 529 157	5 973 063	8 238 659	10 382 781
SCR rachat	9 644 975	10 450 133	10 706 574	10 394 363	10 073 830
SCR frais	951 872	4 232 717	1 516 279	7 219 707	8 074 359
SCR cat vie	95 615.52	235 277.1	398 204.2	549 243.9	692 185.4

**TABLE 4.12** – Projection du SCR vie

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR vie	10 316 799	13 909 541	13 309 820	18 445 283	20 201 233

#### 4.4.1.3 Projection du SCR concentration

Le SCR concentration vise à couvrir le risque de pertes significatives résultant d'une exposition excessive à une seule contrepartie ou à un groupe d'actifs fortement corrélés. Il est ainsi donnée par :

$$SCR_{concentration} = \sqrt{\sum_i conc_i^2}$$

Pour chaque groupe d'émetteurs appartenant au même groupe  $i$ , on calcule la concentration de la compagnie envers ce groupe  $i$  et on la note  $conc\_i$  :

$$conc_i = b_i \times (E_i - a_i \times Assiette); \text{ si } E_i > a_i \times Assiette$$

Où

- $E_i$  est le montant des actifs, autres que les valeurs de l'état ou celles jouissant de sa garantie correspondant à l'ensemble d'émetteurs appartenant au groupe  $i$  ;
- *Assiette* est le montant des placements en valeur marché ;
- $a_i$  est le seuil à partir duquel le dépassement en exposition doit être choqué ;
- $b_i$  est le choc à appliquer.

#### Calibrage du risque de concentration

Pour calibrer le risque de concentration, les données qui ont été utilisées sont :

- Les montants des capitalisations flottantes des actions cotées à la bourse de Casablanca ;
- L'ensemble des actions non cotées détenues par les entreprises d'assurance et réassurance ;
- La base de données des obligations privées, bons de sociétés de financement, certificats de dépôts transmise par l'AMMC ;
- Le total des encours des placements sur le marché des assurances hors valeurs de l'état ou celles jouissant de sa garantie.

Dans ce contexte plusieurs hypothèses ont été retenues :

- L'entreprise d'assurance ou de réassurance limite le risque de concentration en répartissant équitablement ses placements, hors valeurs de l'État ou celles jouissant de sa

garantie, entre plusieurs groupes d'émetteurs disposant de suffisamment d'instruments financiers sur les marchés. Tout écart de cette répartition entraîne une mobilisation du capital.

- L'ensemble des opportunités d'investissement de l'entreprise d'assurances et de réassurance correspond aux instruments financiers disponibles au niveau des marchés des actions (cotées et non cotées), des obligations privées, des bons de sociétés de financement, des certificats de dépôt et billets de trésorerie, des fonds de placements commun en titrisation.
- L'ensemble des actions non cotées détenues par les entreprises d'assurance et de réassurance représente l'intégralité du marché des actions non cotées.

### 1. Détermination du seuil $a_i$

Pour identifier le nombre de groupes d'émetteurs capables d'approvisionner le marché en quantité suffisante d'instruments financiers – condition essentielle pour fixer le seuil au-delà duquel une exposition doit être pénalisée – un calibrage a été réalisé sur un portefeuille d'investissements. Ce portefeuille est composé d'instruments disponibles sur les marchés : actions (cotées et non cotées), obligations privées, bons de sociétés de financement, certificats de dépôt, billets de trésorerie et parts de fonds communs de titrisation. À partir de cette analyse, 197 groupes d'émetteurs ont été recensés. En appliquant un scénario d'abattement de 35 % sur les montants disponibles, une itération a permis d'identifier les groupes disposant d'une offre suffisamment large pour garantir une répartition équilibrée des investissements (hors titres souverains).

### 2. Détermination du choc à appliquer à $b_i$

Le calibrage a été réalisé à dire d'expert.

**TABLE 4.13** – Projection du SCR concentration

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR_con	39 752 935	45 109 369	48 546 563	50 366 926	49 975 085

#### 4.4.1.4 Projection du SCR Contrepartie

Puisque le produit étudié, dans sa configuration initiale, ne prévoit pas de réassurance, le risque de contrepartie est écarté dans le scénario central. Cependant, il est pris en compte dans la section consacrée à la réassurance.

#### 4.4.1.5 Projection du SCR opérationnel

Selon l'ACAPS, le SCR opérationnel se calcule comme étant 8% du capital de solvabilité requis de base (BSCR).

**TABLE 4.14** – Projection du SCR opérationnel

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR_op	3 377 523	3 891 076	4 210 833	4 612 412	4 890 153

#### 4.4.1.6 Projection du SCR global

Sous SBR, le SCR global est obtenu à l'aide de la formule suivante :

$$SCR = BSCR + SCR \text{ opérationnel} - \text{ajustement}$$

avec :

- BSCR représente le capital de solvabilité requis de base et correspond à la somme agrégée des SCR relatifs aux risques de marché, de concentration, de contrepartie et de souscription vie et ce, selon leurs corrélations.

**TABLE 4.15** – La projection du BSCR

	2023	2024	2025	2026	2027
BSCR	42 552 218	48 592 181	52 706 039	57 951 267	61 740 908

Le SCR global est ainsi obtenu.

**TABLE 4.16** – Projection du SCR

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR	45 956 396	52 479 556	56 922 522	62 587 369	66 680 180

## 4.4.2 Projection des fonds propres

Dans le cadre de SBR, les fonds propres (FP) se calculent comme étant la différence entre la valeur des actifs et les engagements de l'assureur envers ses assurés. Ces derniers sont représentés principalement par les provisions techniques.

**TABLE 4.17** – Projection des fonds propres

	2023	2024	2025	2026	2027
Fonds propres	116 189 191	122 771 269	127 088 499	132 509 599	136 259 049

## 4.4.3 Projection des provisions techniques

Dans le cadre de la norme SBR, les provisions techniques, notées PT, sont calculées en cas d'assurance vie comme la somme des éléments suivants :

$$PT = ME + MR$$

Avec :

- **ME** représente la meilleure estimation(ou best estimate) des flux futurs ;
- **MR** représente la marge de risque.

**TABLE 4.18** – Projection des provisions techniques

	2023	2024	2025	2026	2027
PT	-32 380 232	-17 240 108	-7 799 491	8 616 980	20 578 539

### 4.4.3.1 Projection de la meilleure estimation

La meilleure estimation(ME) des flux futurs est calculée comme la somme de la meilleure estimation des engagements garantis probabilisés (MEGP) et les bénéfices discrétionnaires futurs (BDF).

$$ME = MEGP + BDF$$

**TABLE 4.19** – Projection de la meilleure estimation

	2023	2024	2025	2026	2027
BE	-33 308 744	-17 893 740	-8 074 023	9 031 309	21 637 885

#### 4.4.3.2 Projection de la Marge de Risque

La marge de risque (RM), se calcule par la formule suivante :

$$MR = \alpha \times \sum_{i \geq 0} \frac{SCR_i}{(1 + r_{i+1})^i}$$

avec,

$$SCR_i = \frac{ME_{\text{engagement } i}}{ME_{\text{engagement } 0}} \times SCR_0$$

**TABLE 4.20** – Projection de la marge de risque

	2023	2024	2025	2026	2027
RM	928 511.9	653 631.9	274 531.8	-414 328.4	-1 059 346

## 4.5 Scénarios de stress

Compte tenu des contraintes de temps et de disponibilité des données, il n'a pas été possible d'intégrer de nouveaux risques, tels que les risques émergents, notamment le risque climatique et/ou le risque d'image (ou de réputation), bien qu'ils puissent avoir une influence significative sur notre produit ainsi que sur l'activité globale de l'assureur.

Afin de rester dans le périmètre de faisabilité d'un exercice ORSA, nous avons choisi de nous focaliser sur le recalibrage de certains sous-risques du Pilier 1, à savoir les risques de rachat, de mortalité et de taux, en évaluant leur impact à travers des scénarios de stress appliqués aux indicateurs clés de solvabilité et de rentabilité.

### 4.5.1 Sous-risque rachat

Le risque de rachat est particulièrement présent dans notre produit, compte tenu de sa nature d'épargne qui rend les assurés plus enclins à sortir du contrat à tout moment. Cette sensibilité est d'autant plus marquée que certaines caractéristiques du produit, comme l'absence de taux minimum garanti (TMG), n'encouragent pas fortement la fidélité des assurés.

Cependant, étant donné que le produit est très récent, il n'a été lancé qu'en 2019, nous ne disposons pas encore d'un historique de données suffisant pour recalibrer ce sous-risque de manière fiable et robuste.

De ce fait, nous avons donc opté pour une approche alternative basée sur des scénarios de chocs. Il s'agit de mesurer et de visualiser, pour chaque année de l'horizon de projection, l'impact de différents niveaux de chocs de rachat sur les deux dimensions : la solvabilité de la compagnie, via le ratio de solvabilité, et sa rentabilité, à travers le Return on Equity (ROE) (voir annexe pour le résultat détaillé).

Ainsi, les chocs retenus sont ceux ayant entraîné une baisse du ratio de solvabilité et du Return on Equity en dessous des seuils que nous avons fixés lors de la définition de l'appétence au risque, à savoir 200% pour le ratio de solvabilité et 12% pour le ROE.

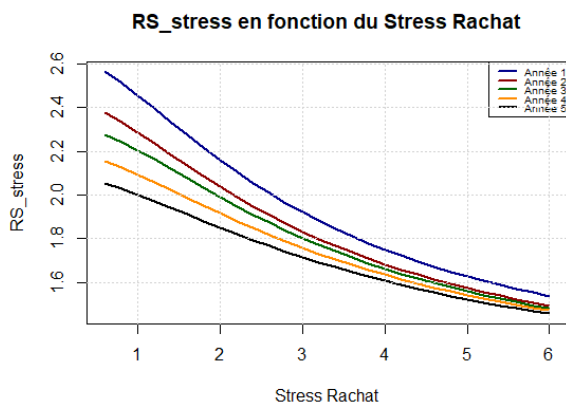


FIGURE 4.9 – Impact des stress tests de Rachat sur RS

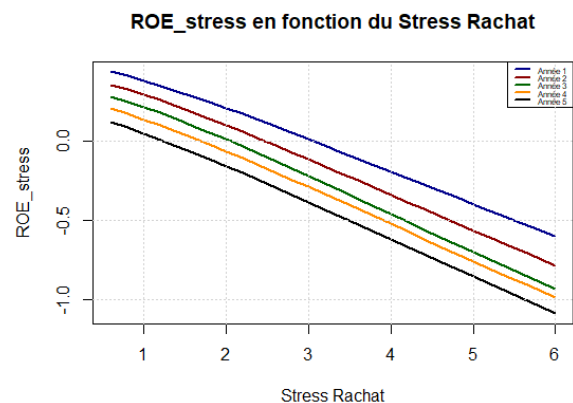


FIGURE 4.10 – Impact des stress tests de Rachat sur ROE

### 4.5.2 Sous-risque mortalité

Le risque de mortalité impacte significativement le produit étudié, bien que dans une moindre mesure que le risque de rachat, tant en termes de solvabilité que de rentabilité. En effet, une hausse soudaine de la mortalité, au-delà des niveaux anticipés, pourrait avoir des conséquences importantes sur la situation financière de l'assureur.

Au-delà de l'augmentation immédiate des prestations à verser, un tel choc pourrait contraindre l'entreprise à liquider des actifs financiers de manière anticipée, parfois avant échéance, et dans des conditions de marché défavorables. Cela générerait non seulement des pertes potentielles sur ces actifs, mais affecterait aussi la liquidité globale du portefeuille et la stabilité du bilan.

Tout comme pour le risque de rachat, et en raison du manque d'un historique suffisant, le recalibrage du sous-risque de mortalité a été effectué en mesurant et en visualisant l'impact de différents scénarios de chocs de mortalité sur la solvabilité et la rentabilité de la compagnie (voir annexe pour le résultat détaillé).

Ainsi, les chocs de mortalité retenus sont ceux qui entraînent une baisse du ratio de solvabilité et du retour sur fonds propres en dessous des seuils prédéfinis.

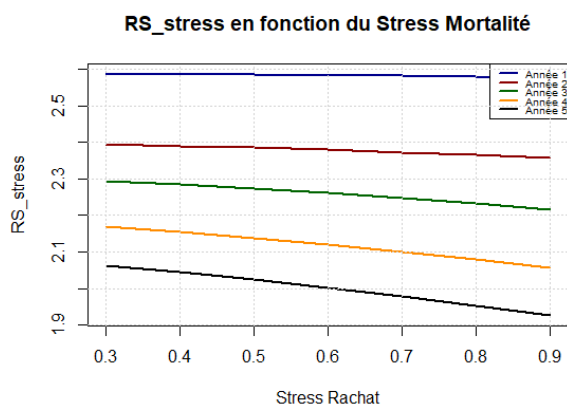


FIGURE 4.11 – Impact des stress tests de Mortalité sur RS

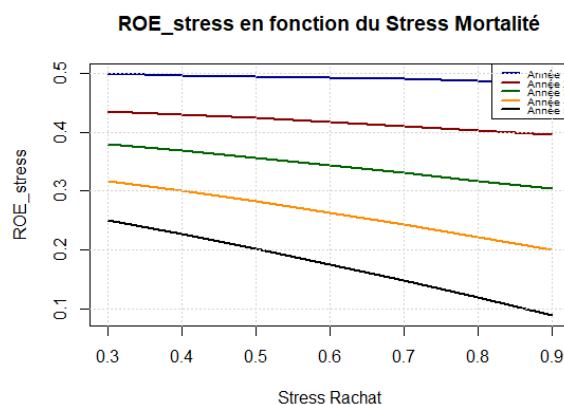


FIGURE 4.12 – Impact des stress tests de Mortalité sur ROE

### 4.5.3 Recalibrage du sous-risque taux

Pour un produit d'épargne, le risque de taux constitue une force motrice déterminante dans l'élaboration des stratégies d'investissement, non seulement en raison de son impact sur les résultats financiers, notamment lorsque la baisse des taux complique le respect par l'assureur de ses engagements contractuels tels que les taux minimum garantis (TMG), mais aussi en raison de son influence sur le comportement des assurés, une période prolongée de hausse des taux pouvant entraîner un recours massif aux rachats afin de bénéficier de meilleures opportunités de placement.

C'est pour cette raison que nous allons nous intéresser à un recalibrage de la courbe des taux, afin de l'adapter mieux à la période étudiée.

Pour ce faire, nous allons adopter une approche similaire à celle utilisée par l'ACAPS, en nous appuyant notamment sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette analyse sera

réalisée à partir d'une base de données des taux moyens pondérés des émissions des bons du trésor, extraite de Bank Al-Maghrib, et étendue sur la période allant de 2012 à 2024, avec des maturités comprises entre 1 an et 15 ans.

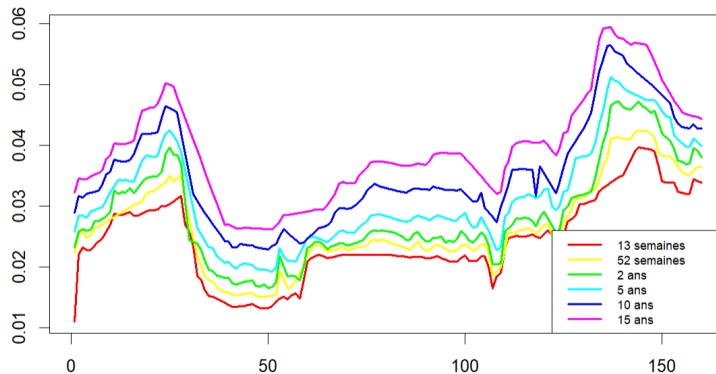


FIGURE 4.13 – Taux d'émission des bons du Trésor

Les données pour l'ACP sont généralement présentées sous la forme d'un tableau comme suit :

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1j} & \cdots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{i1} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{ip} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nj} & \cdots & x_{np} \end{pmatrix}$$

Nous allons donc considérer le tableau des taux retenus, où  $n$  désigne le nombre d'observations et  $p$  représente les maturités disponibles.

Dans un premier temps, nous allons vérifier la pertinence de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) en évaluant sa capacité à compresser efficacement l'information disponible, et ce, à l'aide du test de sphéricité de Bartlett ainsi que du test KMO :

- Pour le test de sphéricité de Bartlett, nous avons obtenu une p-value de  $2.22 \times 10^{-16} < 0,05$ , ce qui nous conduit à rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle la matrice de corrélation  $R$ , associée au tableau  $X$ , serait égale à la matrice identité. Ceci indique que les variables sont corrélées, justifiant ainsi l'utilité de l'Analyse en Composantes Principales (ACP).
- Par ailleurs, le critère KMO a donné un indice global de 0,875811, ce qui confirme la pertinence de l'ACP.

Pour étudier les résultats obtenus, commençons par examiner la variance cumulée expliquée

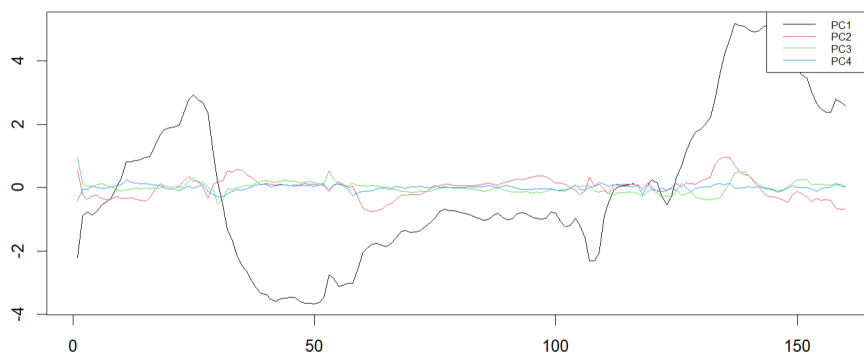
par les composantes principales.

Composante	Variance expliquée	Variance cumulée
PC1	0,9735	0,9735
PC2	0,0176	0,9911
PC3	0,0059	0,9969
PC4	0,0014	0,9983
PC5	0,0010	0,9994
PC6	0,0006	1,0000

**TABLE 4.21** – Pourcentage de variance expliquée et cumulée par chaque composante principale

Ces résultats permettent de constater que quatre composantes principales suffisent à expliquer 99,83% de la variance totale observée. Cela met en évidence que ces quatre composantes capturent l'essentiel de la dynamique de la structure par termes des taux d'intérêts.

La variation des quatre composantes principales retenues est donnée comme suit :



**FIGURE 4.14** – Variation des quatre composantes principales

Le graphique illustre clairement que la majorité de la variabilité observée dans les données est capturée par la première composante principale, caractérisée par des fluctuations significatives. À l'inverse, les composantes suivantes présentent des variations nettement plus faibles, ce qui confirme leur rôle secondaire dans la représentation de l'information initiale.

Afin d'expliquer les mouvements des taux, nous visualisons l'évolution des composantes principales en fonction des maturités :

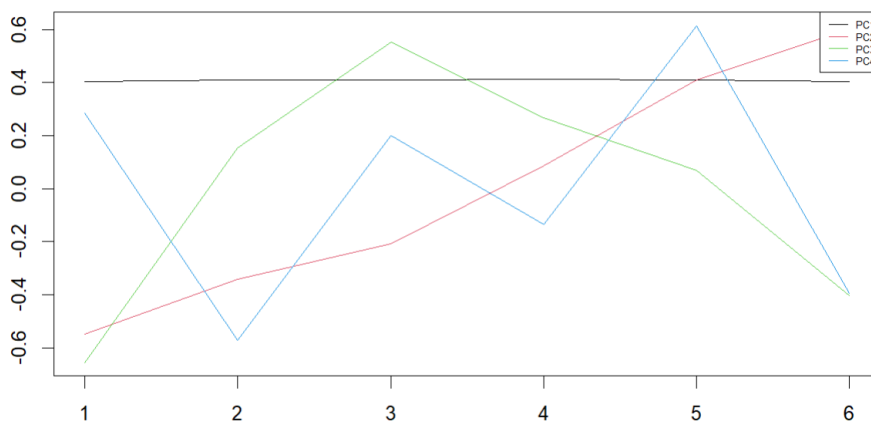


FIGURE 4.15 – Variation des quatre composantes principales

La première composante présente des coordonnées relativement constantes quelle que soit la maturité. Cela indique qu'elle représente un mouvement de translation verticale de l'ensemble de la courbe des taux. En d'autres termes, une hausse des taux d'intérêt à court terme s'accompagne d'un relèvement parallèle des taux à long terme. Ce type de variation est qualifié de variation en niveau, car il affecte l'ensemble de la courbe de manière uniforme, sans en modifier la pente ni la courbure.

La deuxième composante présente des coordonnées négatives pour les maturités courtes et positives pour les maturités longues. Elle traduit une évolution opposée entre les taux à court terme et ceux à long terme, ce qui reflète une variation de la pente de la courbe des taux. Autrement dit, cette composante correspond à un mouvement de pentification : une hausse des taux à long terme, tandis que les taux à court terme restent stables voire diminuent. Ce phénomène rend la courbe, initialement concave, plus linéaire, se rapprochant ainsi d'une droite.

La troisième composante présente des coordonnées qui croissent pour les maturités courtes, puis décroissent pour les maturités plus longues. Elle met en évidence une variation de la courbure de la courbe des taux. Ce type de mouvement reflète des ajustements au niveau des taux intermédiaires, sans affecter directement les extrémités de la courbe, ce qui modifie la concavité de la courbe.

La quatrième composante correspond à un effet de torsion, caractérisé par une convexité locale de la courbe des taux. Ce facteur traduit des variations ponctuelles et asymétriques de la courbure, provoquant des déformations plus complexes que celles observées avec les simples changements de niveau, pente ou courbure globale.

Les chocs à retenir correspondent aux quantiles empiriques aux niveaux 0,5% et 99,5%, calculés pour chaque maturité à partir des taux lissés grâce aux quatre composantes principales. Par

ailleurs, une interpolation linéaire a été utilisée pour combler les maturités manquantes de la courbe des taux.

Maturité	Choc hausse	Choc baisse
1	64,27%	-24,19%
2	82,73%	-41,71%
3	80,83%	-40,73%
4	78,93%	-39,75%
5	77,02%	-38,77%
6	77,04%	-40,22%
7	77,07%	-41,66%
8	77,09%	-43,10%
9	77,11%	-44,55%
10	77,14%	-45,99%
11	73,86%	-43,18%
12	70,59%	-40,37%
13	67,32%	-37,56%
14	64,04%	-34,75%
15	60,77%	-31,94%

**TABLE 4.22** – Chocs de taux d'intérêt par maturité

Nous avons ensuite appliqué ces chocs simultanément, dans un premier temps, sur le bilan prudentiel et le business plan initiaux. Nous présentons ci-après les différentes composantes avant et après stress.

### 1. Impact des scénarios de stress sur le résultat

**TABLE 4.23** – Résultat central vs Résultat stressé

	2023	2024	2025	2026	2027
Résultat initial	60 054 458	56 725 689	53 219 401	48 540 972	42 220 850
Résultat après stress	4 754 493	-6 788 527	-16 084 827	-23 134 141	-31 497 227

### 2. Impact des scénarios de stress sur $SCR_{vie}$

**TABLE 4.24** –  $SCR_{vie}$  central vs  $SCR_{vie}$  stressé

	2023	2024	2025	2026	2027
$SCR_{vie}$ initial	10 316 799	13 909 541	13 309 820	18 445 283	20 201 233
$SCR_{vie}$ après stress	75 785 548	84 519 913	88 420 385	93 494 375	96 358 912

### 3. Impact des scénarios de stress sur le ratio de solvabilité(RS)

**TABLE 4.25** – RS central vs RS strssé

	2023	2024	2025	2026	2027
RS central	2.551	2.398	2.294	2.171	2.075
RS strssé	1.961	1.863	1.828	1.776	1.729

### 4. Impact des scénarios de stress sur le return on equity(ROE)

**TABLE 4.26** – ROE central vs ROE stressé

	2023	2024	2025	2026	2027
ROE central	0.501	0.452	0.409	0.359	0.309
ROE stressé	0.051	-0.072	-0.174	-0.245	-0.339

Nous constatons que, sous des configurations extrêmes des taux de rachat et de mortalité, la compagnie peut subir une chute importante de son résultat ainsi qu'une dégradation significative de son ratio de solvabilité, s'éloignant alors fortement de son appétence au risque et de ses objectifs de rentabilité. Le recours à la réassurance s'avère dès lors particulièrement pertinent, car il constitue une option efficace pour faire face à de telles situations et préserver des niveaux satisfaisants de solvabilité et de performance. Il devient donc essentiel d'optimiser le programme de réassurance afin d'en maximiser les bénéfices, tant sur le plan prudentiel que sur celui de la rentabilité.

## 4.6 Optimisation de la réassurance & résultat

Comme la réassurance constitue l'un des outils majeurs de pilotage des risques au sein des compagnies d'assurance, l'objectif est donc de déterminer le programme de réassurance optimal qui servira à absorber les pertes liées aux scénarios de stress proposés.

Avant d'entamer l'optimisation, il convient de déterminer le taux des primes de réassurance. En se basant sur une tarification en Burning Cost pour les traites en XS, il est convenu, dans un premier temps, de revaloriser les données utilisées à l'année de cotation 2022. À cet effet, l'indice des prix à la consommation (IPC) est utilisé :

	année	IPC
1	2019	102.1
2	2020	102.4
3	2021	103.8
4	2022	110.8

Après revalorisation, le taux de burning cost pour chaque traité XS est obtenu en divisant la charge totale par les primes. Ce taux permet d'estimer les primes ainsi que les commissions mobilisées, impactant directement le compte de résultat. Par ailleurs, la charge prise en charge par le réassureur contribue à atténuer l'impact des sinistres sur la cédante. En parallèle, il est nécessaire d'intégrer le SCR de défaut, d'où l'importance de l'optimisation, qui intervient afin de déterminer les paramètres optimaux pour chaque traité.

## 4.6.1 Optimisation

### 4.6.1.1 Optimisation non linéaire (PNL)

L'optimisation non linéaire avec contraintes est une approche à objectif unique. Dans notre cas, nous cherchons à atteindre deux objectifs : optimiser la solvabilité (RS) et optimiser la rentabilité (ROE). Ainsi, nous avons choisi de conserver l'une de ces deux dimensions comme fonction objectif, et d'intégrer l'autre sous forme de contrainte.

Nous avons procédé dans les deux sens. Étant donné que les résultats obtenus sont similaires, nous ne présenterons qu'un seul cas : l'optimisation du Return on Equity (ROE) sous la contrainte d'un ratio de solvabilité supérieur à 200%.

$$\begin{aligned} \text{Minimiser} & \quad 0,12 - ROE(p) \\ \text{S.C} & \quad 2 - RS(p) \leq 0, \end{aligned}$$

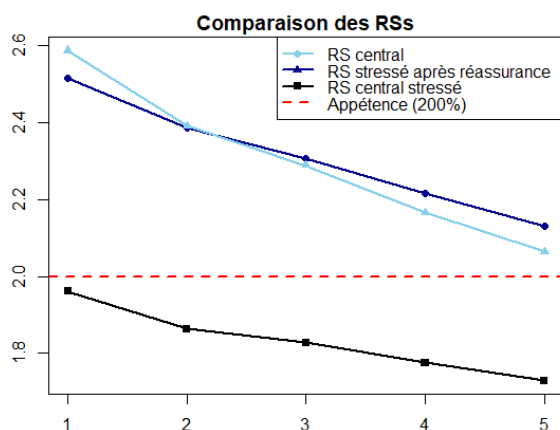
avec  $p$  représente les différentes configurations possibles de réassurance qui sont dans la plage définie préalablement (nous avons pris 600000 comme minimum et 9000000 comme maximum) que peuvent prendre les priorités et les portés des XS.

Nous avons trouvé les solutions suivantes :

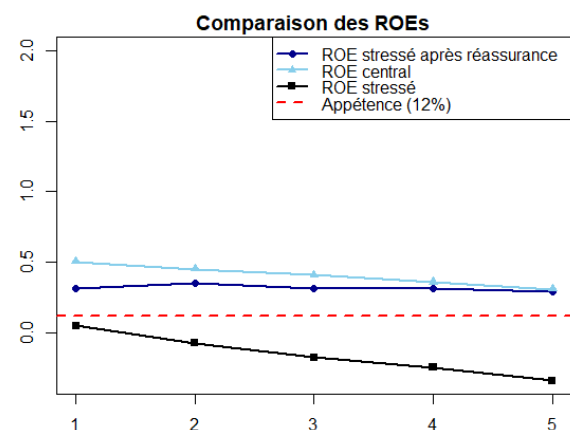
**TABLE 4.27** – Les programmes optimaux(PNL)

	Priorité1	Porté1	Priorité2	Porté2
2023	600 000	31 731 941	1 611 004	38 676 399
2024	600 000	37 818 274	872 233.6	39 193 387
2025	600 000	39 104 795	1 007 175	23 838 023
2026	600 000	25 404 639	600 000	35 586 225
2027	600 000	35 839 932	600 000	37 260 098

Ci-après, nous présentons une visualisation de l'impact des programmes optimaux sur le ROE et le ratio de solvabilité (RS), après application des chocs issus des stress tests.



**FIGURE 4.16** – Ratio de solvabilité (PNL)



**FIGURE 4.17** – Return on equity (PNL)

Sur l'ensemble de la période de projection, les programmes optimaux de réassurance se sont révélés efficaces pour absorber les scénarios de stress, permettant ainsi de maintenir un niveau de ratio de solvabilité et de rentabilité (ROE) supérieur à notre appétence au risque ainsi qu'à nos objectifs de performance.

Cependant, nous n'avons pas pu nous limiter à l'approche d'optimisation sous contraintes, et ce pour deux raisons principales :

- D'une part, cette approche repose sur un cadre monoobjectif : il n'était pas possible d'optimiser simultanément le ratio de solvabilité (RS) et le ROE. L'un des deux critères devait nécessairement être intégré sous forme de contrainte.
- D'autre part, l'implémentation sous R, notamment à travers l'utilisation de l'algorithme `NLOPT_GN_ISRES`, a nécessité un temps de calcul significatif pour atteindre la

convergence des solutions.

C'est pour ces raisons que nous avons eu recours à une approche d'optimisation multi-objectifs, en particulier à l'algorithme génétique NSGA-II. Cette méthode permettra de prendre en compte simultanément les deux principaux critères de performance, à savoir le ratio de solvabilité (RS) et le retour sur fonds propres (ROE), sans qu'il soit nécessaire de privilégier l'un au détriment de l'autre. Par ailleurs, l'utilisation de l'algorithme NSGA-II offrira la possibilité d'intégrer d'autres éléments pertinents tels que le résultat net et le capital de solvabilité requis (SCR).

Grâce à cette approche, il sera possible de générer une frontière de Pareto illustrant les arbitrages envisageables entre solvabilité et rentabilité.

#### 4.6.1.2 Optimisation par algorithme génétique (optimisation multi-objectif)

Pour déterminer le programme de réassurance optimal, nous avons jugé pertinent d'adopter l'approche d'optimisation multi-objectifs en adoptant une approche à posteriori présentée dans la section 3.3.2. Celle-ci vise à maximiser le résultat de l'exercice tout en minimisant les risques, dans le respect des contraintes d'appétence au risque. Le programme est ainsi optimisé de manière dynamique à chaque exercice du Business Plan, afin de garantir en permanence le respect du besoin global en solvabilité.

Dans le cadre de l'intégration d'un programme de réassurance, on va intégrer le SCR défaut, ce qui entraîne une augmentation du SCR global. Toutefois, le transfert de risque au réassureur permet à la cédante de réduire le SCR souscription, notamment à travers la diminution du SCR rachat et du SCR mortalité, tout en ayant un impact sur le résultat obtenu.

Les objectifs retenus dans le cadre de l'optimisation sont les suivants :

- Minimiser le  $SCR_i$  à l'année de projection  $i$  ;
- Maximiser le résultat net annuel.

Concernant les contraintes prises en compte, nous allons nous intéresser aux appétences au risque définies dans les chapitres précédents :

- Maintien d'un ratio de solvabilité supérieur à 200 %, d'où l'on cherche à minimiser :

$$g_{RS_i} = (200\% - RS)$$

- Obtention d'un ROE supérieur à 12 %, d'où l'on cherche à minimiser :

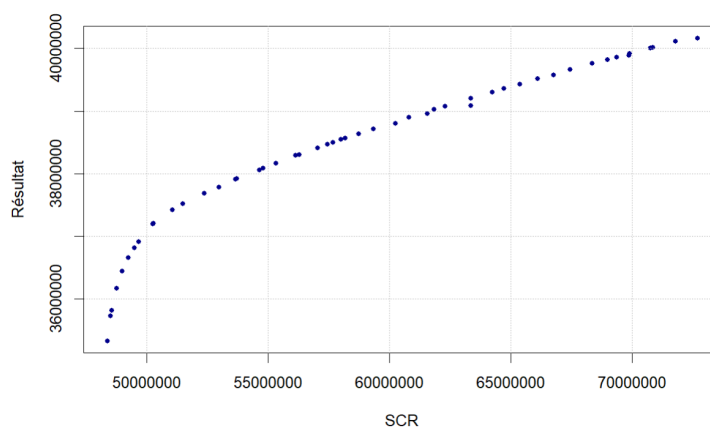
$$g_{ROE_i} = (12\% - ROE)$$

La fonction objectif à considérer pour l'année de projection  $i$  est donc :

$$\min(-f_{\text{résultat}_i}, f_{SCR_i}, g_{ROE_i}, g_{RS_i})$$

On va tester un programme de réassurance comportant deux traités en excédent de sinistre par risque (rachat, décès), appliqués à l'ensemble des assurés.

La frontière de Pareto illustrant le compromis entre les deux objectifs, à savoir le résultat net et le capital de solvabilité requis, est illustrée pour la première année comme suit :



**FIGURE 4.18** – frontière de Pareto

Le tableau ci-dessous récapitule quelques résultats obtenus :

XS1		XS2		résultats			
priorité 1	portée 1	priorité 2	portée 2	SCR	résultat	ROE	RS
1000007	29999950	1528377	18314630	48388863	35326893	0.316	2.45
1256155	29999984	1000393	11802772	48507127	35727984	0.318	2.44
1350405	30000000	1006015	11842216	48553582	35811752	0.318	2.44
1741515	29999826	1009752	18341418	48766089	36165381	0.32	2.44
2094148	29999995	1097826	21095991	48983584	36439570	0.32	2.43
2464777	30000000	1007262	16860208	49250026	36658042	0.32	2.42

La compagnie a par la suite le choix de la solution qui s'aligne avec ses objectifs et s'adapte le mieux à sa stratégie.

#### 4.6.2 Résultats et comparaison

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressées à deux programmes candidats : le premier consistant en un programme avec deux traités excédents de sinistres (XS) par risque, et le second combinant un traité XS avec un traité en quote-part. En nous appuyant sur les résultats obtenus, le premier programme a été jugé plus performant, ce qui nous a conduit à retenir ses résultats comme base principale de notre analyse. Quant aux résultats issus du second programme, ils sont présentés en annexe à titre complémentaire voir section 5.1.

Par ailleurs, les traités XS optimaux retenus pour chaque année nous permettent de déduire les taux annuels de *Burning Cost* suivants :

Traité	2023	2024	2025	2026	2027
1	0,070	0,076	0,094	0,094	0,094
2	0,015	0,015	0,012	0,015	0,00339

Les primes de réassurance sont calculées à partir des taux burning cost. En appliquant un taux de commission de 30%, le résultat de réassurance est intégré dans le compte de résultat, comme expliqué au chapitre 2 :

	2023	2024	2025	2026	2027
Résultat du stress test	4 754 493	-6 788 527	-16 084 827	-23 134 141	-31 497 227
Résultat de réassurance	34 596 010	33 947 407	36 346 434	31 669 541	44 242 412

Ainsi, L'intégration de ces traités de réassurance fait évoluer le risque de défaut, qui n'était initialement pas pris en compte, en un risque désormais significatif, tandis que le SCR lié à la souscription diminue. Par conséquent, les capitaux de solvabilité requis correspondant aux risques de souscription et de défaut sont les suivants :

	2023	2024	2025	2026	2027
SCR vie sous stress test	75 785 548	84 519 913	88 420 385	93 494 375	96 358 912
SCR vie sous réassurance	49 400 011	53 492 280	56 276 477	59 870 172	62 813 325
SCR défaut	15 065 056	11 375 877	9 300 700	4 623 662	1 485 878

Sur l'horizon de projection de cinq ans, les résultats obtenus en termes de solvabilité et de rentabilité sont illustrés par les graphiques ci-dessous :

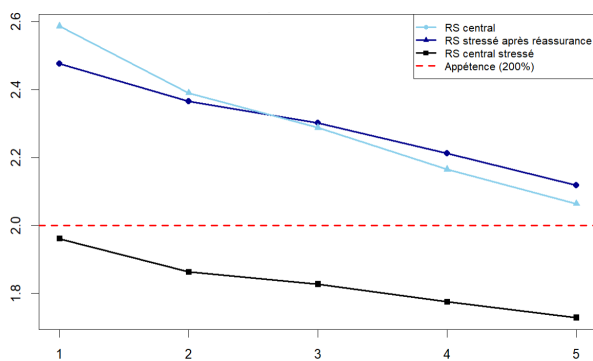


FIGURE 4.19 – Ratio de solvabilité (NSGA-II)

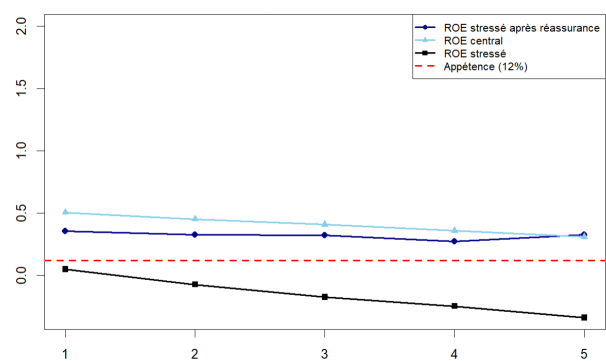


FIGURE 4.20 – Return on equity (NSGA-II)

On en conclut que l'intégration des traités de réassurance XS dans le cadre d'un scénario stressé permet de vérifier que la contrainte relative au ratio de solvabilité, ainsi que celle portant sur le résultat net, est respectée tout au long de l'horizon de projection.

# Conclusion

En somme, l'étude développée tout au long de ce projet met en lumière l'impact d'une stratégie de réassurance dans un univers caractérisé par la multiplicité des risques et la volatilité accrue du marché et du comportement des assurés. Une telle complexité nécessite une analyse rigoureuse et méthodique, capable d'anticiper et d'absorber l'ensemble des aléas susceptibles d'engendrer des pertes inattendues. Ces dernières peuvent affecter non seulement les résultats techniques et financiers de la compagnie d'assurance, mais également sa solvabilité et sa capacité à honorer ses engagements contractuels.

C'est dans ce contexte qu'intervient l'approche fondée sur la solvabilité basée sur les risques, dont l'objectif est de combler les éventuelles défaillances des dispositifs traditionnels, en renforçant la résilience des assureurs face à tout type de choc. Cette démarche trouve une traduction concrète dans le Pilier 2, notamment à travers l'ORSA (Own Risk and Solvency Assessment), véritable outil stratégique d'évaluation interne des risques.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à l'impact d'une stratégie de réassurance optimale dans un cadre ORSA, mettant en jeu la variabilité des niveaux de risques, en particulier dans des scénarios extrêmes. Les risques de rachat, de mortalité et de taux, considérés comme essentiels dans la conception d'un produit d'épargne, ont été au cœur de notre réflexion. Le programme de réassurance envisagé s'est avéré pertinent pour optimiser simultanément la rentabilité et la solvabilité associées au produit étudié.

Néanmoins, cette analyse, bien qu'approfondie, ne saurait prétendre à l'exhaustivité. La gestion des risques en assurance demeure un champ d'étude complexe, qui appelle à une réflexion continue et à une prise en compte élargie de nouvelles sources de vulnérabilité. L'intégration de risques émergents tels que le risque de réputation, le risque climatique ou encore le risque cyber pourrait enrichir considérablement les perspectives de cette recherche. En ce sens, une évaluation exhaustive des risques, telle que promue par le cadre ORSA, s'inscrit comme un levier fondamental pour affiner la stratégie de l'assureur, orienter ses décisions, et garantir, à long terme, à la fois sa solidité financière et sa solvabilité.

# Annexe

## 5.1 Résultats obtenus par le programme combinant une couverture en excédent de sinistre (XS) et un traité en quote-part.

Dans un premier temps, nous avons envisagé un programme de réassurance combinant un traité quote-part et un traité excédent de sinistre (XS). En utilisant une optimisation multi-objectifs, nous avons estimé les paramètres à adopter pour chaque année de projection, notamment le taux de cession  $\alpha$  pour le traité quote-part, ainsi que la priorité et la portée pour le traité XS.

les resultatst obtenu sont comme suit :

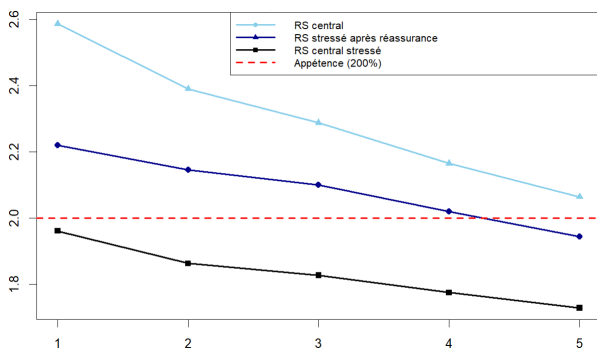


FIGURE 5.21 – Ratio de solvabilité QP& XS

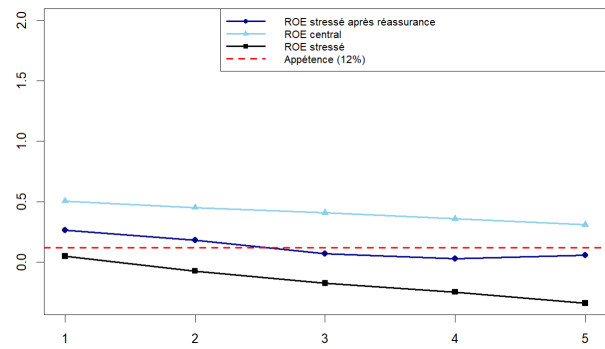


FIGURE 5.22 – Return on equity QP& XS

En termes de rentabilité et de solvabilité, ce programme de réassurance a permis de respecter l'appétence au risque uniquement sur certaines années de l'horizon de projection, tandis que dans d'autres années, cette appétence n'a pas été satisfaite.

## 5.2 Démonstration du prix ZC

$$P(t, T) = \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[ \exp \left( - \int_t^T r_u du \right) \middle| \mathcal{F}_t \right].$$

Pour  $r_t$ , processus gaussien à trajectoires continues, l'intégrale

$$I(t, T) = \int_t^T r_s ds$$

est également gaussienne conditionnellement à  $\mathcal{F}_t$ .

On peut calculer directement la moyenne  $m(t, T)$  et la variance  $v(t, T)$  conditionnellement à  $\mathcal{F}_t$  du processus  $I(t, T)$  sous la mesure  $\mathbb{Q}$  en écrivant :

$$\begin{aligned} I(t, T) &= \int_t^T r(s) ds \\ &= \int_t^T r(t) e^{-a(u-t)} du + \int_t^T b^* (1 - e^{-b^*(u-t)}) du + \int_t^T \sigma \int_t^u e^{-a(u-s)} d\widetilde{W}_s du, \end{aligned}$$

et en admettant qu'un théorème de Fubini stochastique permet l'inversion de l'intégrale brownienne et de l'intégrale de Riemann dans le dernier terme.

On obtient dans ces conditions :

$$I(t, T) = (r_t - b^*) \frac{1 - e^{-a(T-t)}}{a} + b^*(T - t) + \int_t^T \sigma \frac{1 - e^{-a(T-s)}}{a} d\widetilde{W}_s.$$

Ce qui permet de conclure que :

$$m(t, T) = b^*(T - t) + (r_t - b^*) \frac{1 - e^{-a(T-t)}}{a},$$

$$v(t, T) = \frac{\sigma^2}{a^2} \left[ (T - t) - 2 \frac{1 - e^{-a(T-t)}}{a} + \frac{1 - e^{-2a(T-t)}}{2a} \right].$$

Le prix du zéro-coupon s'écrit donc :

$$\begin{aligned}
 P(t, T) &= \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[ e^{-\int_t^T r_s ds} \middle| \mathcal{F}_t \right] \\
 &= \mathbb{E}^{\mathbb{Q}} \left[ e^{-I(t, T)} \middle| \mathcal{F}_t \right] \\
 &= \exp \left[ -m(t, T) + \frac{1}{2} v(t, T) \right]
 \end{aligned}$$

On conclut par calcul direct de cette quantité que :

$$P(t, T) = A(t, T) e^{-B(t, T) r_t}$$

Où :

$$\begin{aligned}
 B(t, T) &= \frac{1}{a} (1 - e^{-a(T-t)}) \\
 A(t, T) &= \exp \left\{ \left( b^* - \frac{\sigma^2}{2a^2} \right) (B(t, T) - (T - t)) - \frac{\sigma^2}{4a} B^2(t, T) \right\}
 \end{aligned}$$

## 5.3 Résultats de sensibilité de la solvabilité et de la rentabilité de la compagnie aux stress tests

### 5.3.1 Sensibilité du ratio de solvabilité et du Return on Equity aux stress de rachat

**TABLE 5.28** – Sensibilité des ROE et RS aux stress du taux de rachat

	Stress_Rachat	RS_stress_An1	RS_stress_An5	ROE_stress_An1	ROE_stress_An5
1	0.600	2.564	2.052	0.438	0.119
2	0.800	2.513	2.027	0.411	0.084
3	1	2.456	2.000	0.381	0.047
4	1.200	2.396	1.971	0.350	0.008
5	1.400	2.336	1.941	0.317	-0.032
6	1.600	2.275	1.911	0.282	-0.073
7	1.800	2.216	1.881	0.246	-0.115
8	2	2.160	1.851	0.208	-0.158
9	2.200	2.106	1.822	0.170	-0.202
10	2.400	2.056	1.794	0.131	-0.247
11	2.600	2.008	1.767	0.091	-0.293
12	2.800	1.963	1.741	0.051	-0.339
13	3	1.921	1.716	0.011	-0.385
14	3.200	1.882	1.692	-0.030	-0.432
15	3.400	1.846	1.669	-0.071	-0.479
16	3.600	1.812	1.648	-0.112	-0.526
17	3.800	1.780	1.627	-0.153	-0.573
18	4	1.750	1.607	-0.194	-0.621
19	4.200	1.723	1.589	-0.235	-0.668
20	4.400	1.697	1.571	-0.276	-0.716
21	4.600	1.672	1.554	-0.317	-0.763
22	4.800	1.649	1.538	-0.358	-0.811
23	5	1.628	1.523	-0.398	-0.858
24	5.200	1.608	1.508	-0.439	-0.905
25	5.400	1.589	1.494	-0.479	-0.952
26	5.600	1.571	1.481	-0.519	-0.999
27	5.800	1.554	1.468	-0.559	-1.046
28	6	1.538	1.456	-0.599	-1.092

### 5.3.2 Sensibilité du ratio de solvabilité et du Return on Equity aux stress de mortalité

**TABLE 5.29** – Sensibilité des ROE et RS aux stress du taux de mortalité

	Stresss_mort	RS_stress_An1	RS_stress_An5	ROE_stress_An1	ROE_stress_An5
1	0.300	2.587	2.064	0.499	0.251
2	0.400	2.586	2.046	0.497	0.227
3	0.500	2.585	2.026	0.495	0.202
4	0.600	2.583	2.003	0.493	0.175
5	0.700	2.582	1.978	0.490	0.148
6	0.800	2.580	1.952	0.488	0.118
7	0.900	2.577	1.926	0.486	0.088

# Bibliographie

- [1] ACAPS : Solvabilité basée sur les risques (SBR), Document de calibrage 2022.
- [2] ACAPS : Solvabilité basée sur les risques (SBR), Spécifications techniques de la troisième étude d'impacts quantitative (EIQ3), 2022.
- [3] Institut des actuaires : Document d'orientation ORSA, L'ORSA : Quelques Exemples de Pratiques actuarielles, 2014.
- [4] Adrien LAGARRIGUE : Comment rendre pragmatique un outil ORSA en assurance-vie? 2017.
- [5] EIOPA : Solvency II Calibration Paper, 2010.
- [6] EIOPA : Guidelines on own risk and solvency assessment 2022.
- [7] SwissLife : ORSA and model risk, Focus on Life insurance 2012.
- [8] Sylvain DETROULLEAU et Sandrine MOURET : Modèle ALM : Apport de la Logique Floue dans la modélisation des comportements 2013.
- [9] Pauline BERGER : Optimisation de couvertures de réassurance dans un environnement aux normes multiples 2022.
- [10] Stéphane Arnaude : Optimisation de la réassurance par algorithme génétique.
- [11] ISFA : Cours réassurance 2007.
- [12] Maroi BEN ARIBI : Optimisation de la réassurance sous une vision ORSA en assurance de personnes 2016.
- [13] BOIDI Kan Ernest : Mise en place d'un outil d'aide à la décision pour l'optimisation de la réassurance des assureurs non-vie 2023.
- [14] Ioane Muni Toke : Modèles stochastiques de taux d'intérêts 2011.
- [15] FARNAULT Kévin : Dynamique des flux d'un contrat d'épargne
- [16] Mohamed Amine OUADEIH : Implémentation d'une nouvelle méthode de modélisation des flux de passif d'un contrat Épargne dans un modèle ALM et comparaison avec la méthode "Flexing" 2018.
- [17] Damien Tichit : Construction d'un modèle ALM pour l'analyse de l'impact d'une remontée des taux sur la solvabilité d'un assureur vie 2019.

- [18] Thibault Myard : Optimisation de la réassurance dans le cadre de l'ORSA.
- [19] Makram Ben Dbabis : Modèles et méthodes actuarielles pour l'évaluation quantitative des risques en environnement solvabilité II 2012.
- [20] Kla Kouadio : Méthodes Prospectives de Calcul de SCRs et Applications 2018.
- [21] <https://www.osfi-bsif.gc.ca/en/guidance/guidance-library/own-risk-solvency-assessment>
- [22] [https://www.ressources-actuarielles.net/C1256F13006585B2/0/0B9DF464E9543283C1256F130067B2F9/\\$FILE/ORSA.pdf?OpenElement](https://www.ressources-actuarielles.net/C1256F13006585B2/0/0B9DF464E9543283C1256F130067B2F9/$FILE/ORSA.pdf?OpenElement)
- [23] [https://www.ressources-actuarielles.net/EXT/ISFA/fp-isfa.nsf/0/0b9df464e9543283c1256f130067b2f9/\\$FILE/ORSA\\_MJ.pdf](https://www.ressources-actuarielles.net/EXT/ISFA/fp-isfa.nsf/0/0b9df464e9543283c1256f130067b2f9/$FILE/ORSA_MJ.pdf)
- [24] <https://www.actuarialab.net/>
- [25] <https://www.bkam.ma/>
- [26] <https://www.forvismazars.com/ma/fr/a-propos/forvis-mazars-au-maroc>