

Mémoire présenté le :
pour l'obtention du Diplôme Universitaire d'actuariat de l'ISFA
et l'admission à l'Institut des Actuaire

Par : Gaylord LEGRIS

Titre : Analyse de Sensibilités sur des Portefeuilles de Passifs en Assurance Vie selon les indicateurs Solvabilité 2 : Approche par Générations et Agrégations des portefeuilles

Confidentialité : ☒ NON ☐ (Durée : ☐ 1 an ☐ 2 ans)

Les signataires s'engagent à respecter la confidentialité indiquée ci-dessus

*Membres présents du jury de Signature
l'Institut des Actuaire*

Entreprise :

Nom :

Signature :

*Directeur de mémoire en entre-
prise :*

Nom :

Signature :

*Membres présents du jury de
l'ISFA*

Invité :

Nom :

Signature :

***Autorisation de publication et
de mise en ligne sur un site de
diffusion de documents actua-
riels (après expiration de l'éventuel
délai de confidentialité)***

Signature du responsable entreprise

Signature du candidat

Table des matières

Résumé	iv
Abstract	v
Remerciements	vi
Synthèse	vii
Synthesis	viii
Introduction	1
0.1 Contexte professionnel et genèse de la problématique chez Accenture	2
0.2 Problématique et objectifs du mémoire	3
1 Contexte réglementaire et modélisation en assurance vie	5
1.1 Les spécificités des produits d'assurance vie épargne	6
1.1.1 Principes fondamentaux du contrat d'assurance vie	6
1.1.2 Les principaux supports d'investissement	7
1.1.3 Contexte économique et enjeux actuels	8
1.2 Le cadre prudentiel Solvabilité II	8
1.2.1 L'approche stochastique et la valorisation économique	9
1.2.2 Le Pilier 1 : Exigences quantitatives	9
1.2.3 Le Pilier 2 : Exigences qualitatives et gouvernance	12
1.2.4 Le Pilier 3 : Exigences de reporting et transparence	13
1.3 Les Générateurs de Scénarios Économiques (GSE)	13
1.3.1 L'univers Risque Neutre (\mathbb{Q}) : un cadre pour la valorisation	14
1.3.2 L'univers Monde Réel (\mathbb{P}) : un outil de pilotage stratégique	16
1.3.3 Synthèse des deux univers	17
1.4 La représentation du passif : le concept de <i>Model Point</i>	17
1.4.1 La nécessité de l'agrégation	18
1.4.2 Les impacts de l'agrégation en MP sur les indicateurs S2	18
2 La Gestion Actif-Passif et le Modèle de Simulation en Python	19
2.1 Principes et Enjeux de la Gestion Actif-Passif (ALM)	20

2.1.1	La Modélisation ALM : un Outil de Projection Essentiel	20
2.2	Architecture et Fonctionnement du Modèle de Projection	21
2.2.1	Phase 1 : Initialisation du Modèle	22
2.2.2	Phase 2 : La Boucle de Projection Annuelle	24
2.2.3	Phase 3 : Finalisation et Génération des Outputs	25
2.3	Limites Actuelles du modèle	26
3	Construction d'un Générateur de Portefeuilles de Passifs Réaliste	27
3.1	Objectifs Stratégiques et Contraintes Techniques	28
3.1.1	Définition du générateur de portefeuilles de passifs	28
3.1.2	Besoins métiers : simulation de nouveaux produits et analyse concurrentielle	28
3.1.3	Défis de la modélisation : réalisme, volumétrie et flexibilité	30
3.2	Méthodologie de Génération et Modélisation Statistique	30
3.2.1	Approche stochastique par lois de probabilité	31
3.2.2	Calibration des distributions marginales à partir des données de marché	32
3.2.3	Perspective : modélisation des dépendances par la théorie des copules	33
3.3	Présentation de l'Outil et du Portefeuille de Référence Généré	34
3.3.1	Architecture de l'application en Python et choix technologiques	35
3.3.2	Description des paramètres d'entrée et des formats de sortie	35
3.3.3	Analyse descriptive du portefeuille de référence	35
4	Protocole d'Analyse : Sélection d'une Méthode d'Agrégation	36
4.1	Présentation des Méthodes d'Agrégation candidates	37
4.1.1	Approches par clustering (K-means, DBSCAN/HDBSCAN)	38
4.1.2	Autres approches (MP par âge, MP Mémoire Amine Ben Fadhel, etc.)	38
4.2	Définition du Protocole de Test Comparatif	38
4.2.1	Constitution des portefeuilles de test	39
4.2.2	Définition des critères de sélection : fidélité des indicateurs (BE/SCR), performance et temps de calcul	39
4.3	Analyse Comparative et Choix de la Méthode Optimale	39
4.3.1	Synthèse des performances pour chaque méthode candidate	40
4.3.2	Justification du choix de la méthode retenue pour l'analyse de sensibilité	40
5	Analyse de Sensibilité des Indicateurs S2 aux Caractéristiques du Passif	41
5.1	Définition des Scénarios de Sensibilité	42
5.1.1	Création des portefeuilles de test via le générateur	43
5.1.2	Description des chocs sur les variables clés (âge, montant de la PM, etc.)	43
5.1.3	Scénario d'intégration d'un nouveau produit dans le portefeuille	43
5.2	Analyse de l'Impact de l'Agrégation sur la Mesure des Chocs	43
5.2.1	Comparaison des indicateurs S2 sur portefeuilles choqués granulaires et agrégés	44
5.2.2	Analyse de la fidélité de la méthode d'agrégation à retranscrire la sensibilité	44
5.3	Interprétation des Résultats et Validation de l'Approche	44
5.3.1	Validation de la performance de la chaîne de modélisation (Générateur - Agrégation - Modèle ALM)	45

5.3.2	Enseignements sur la sensibilité des portefeuilles aux modifications de caractéristiques du passif	45
6	Conclusion	46
6.1	Résumé des résultats	47
6.1.1	Synthèse des principaux résultats obtenus	47
6.1.2	Impact des méthodes d'agrégation sur les portefeuilles de passifs	47
6.2	Perspectives d'amélioration	47
6.2.1	Axes d'amélioration pour les générateurs de portefeuilles de passifs	48
6.2.2	Évolutions possibles des méthodes d'agrégation et de modélisation ALM	48
6.2.3	Autres domaines d'application des générateurs de portefeuilles de passifs	48
6.3	Conclusion Générale et Perspectives	48
6.3.1	Perspectives et Finalisation des Travaux de Recherche	49
6.3.2	Bilan de l'expérience professionnelle chez Accenture : un levier pour le mémoire . .	50
	Annexes	52
	Bibliographie	53

Résumé

Petit résumé en français de mon mémoire ?

Abstract

It's a brief sum up in english !

Remerciements

Pour la réalisation de ce mémoire, je tiens à adresser mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à son élaboration. Que ce soit au travail avec Lionel Aldeberd qui m'a appris énormément, Lucas Blancheton qui a toujours été là pour m'aiguiller dans mes choix. Merci à Luc pour les relectures et à tous mes collègues stagiaires et alternants, Antoine, Cindy, Eleonore, Lucile, Malak, Manon, Nicolas, Tanguy et Titouan pour leur bonne humeur ! J'ai vraiment passé des très chouettes moments à vos côtés !

Synthèse

Un long résumé en français de mon mémoire

Synthesis

Un long résumé en anglais de mon mémoire

Introduction

Placement privilégié des épargnants français, l'assurance vie a atteint un encours record de 1 908 milliards d'euros à fin 2023 (France Assureurs) [4], confirmant ainsi son rôle prépondérant dans le patrimoine financier national. Toutefois, ce secteur fait face à une rupture structurelle marquée par la fin du cycle de taux bas et la remontée brutale des taux d'intérêt observée depuis 2022. Le taux de revalorisation moyen des fonds en euros a ainsi atteint 2,6 % pour l'année 2023 (estimation ACPR). Cette mutation rend d'autres produits d'épargne plus attractifs et exerce une pression concurrentielle inédite sur les contrats d'assurance vie, notamment sur les fonds en euros qui deviennent de moins en moins attractifs. Pour les assureurs, le défi est de taille : leurs portefeuilles d'actifs, majoritairement constitués d'obligations acquises durant la longue période de taux bas, présentent une forte inertie. Cet héritage obligataire freine leur capacité à servir des rendements compétitifs et place la gestion actif-passif (ALM) au cœur des enjeux stratégiques.

Pour piloter leur bilan, les assureurs s'appuient sur des modèles ALM sophistiqués, essentiels pour simuler l'impact de différentes stratégies dans le cadre réglementaire de Solvabilité II. Cependant, la complexité de ces modèles et la nécessité de réaliser un grand nombre de simulations se heurtent à une contrainte opérationnelle majeure : le temps de calcul. Cette contrainte limite la capacité des assureurs à explorer en profondeur l'ensemble des risques et des opportunités. Face à cette réalité, une question centrale émerge : dans quelle mesure peut-on réduire le temps de calcul des modèles tout en préservant la fidélité des indicateurs de risque ? Ce mémoire se propose d'investiguer cette problématique en étudiant l'impact d'une méthode de réduction de lignes dans des portefeuilles de passifs. L'enjeu est de déterminer si une représentation plus grossière du passif peut suffire pour représenter correctement le portefeuille et gérer le pilotage stratégique et sous quelles conditions une telle simplification est valide, sans masquer des dynamiques de risque essentielles.

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire adoptera une double approche. Premièrement, il s'agira de développer un générateur de portefeuilles de passif puis le reste de l'analyse portera sur les effets de l'agrégation sur un portefeuille représentatif du marché français. L'objectif est de comprendre comment les risques évoluent à travers une agrégation. Ce mémoire ne se contentera pas d'analyser l'impact d'une seule méthode d'agrégation ; au contraire, plusieurs méthodes et approches seront testées. Le critère de sélection de la méthode la plus pertinente reposera sur un triple objectif : minimiser l'écart des indicateurs clés (notamment le Best Estimate et le SCR), optimiser la rapidité des calculs et atteindre le plus haut niveau d'agrégation possible qui garderait une significativité économique pour l'assureur suffisante.

L'axe principal de ce mémoire consistera donc à mener une analyse de sensibilités approfondie sur ces

portefeuilles, qu'ils soient granulaires ou agrégés. Notre étude s'appuiera sur des indicateurs quantitatifs clés issus de la norme Solvabilité II, en évaluant notamment l'impact des chocs économiques sur le Best Estimate, le Solvency Capital Requirement (SCR) et la Present Value of Future Profits (PVFP). Ces métriques permettront de mesurer rigoureusement comment l'agrégation modifie la perception du risque et la valeur économique du portefeuille.

Ce mémoire s'articulera en cinq parties distinctes, conçues pour apporter une réponse progressive et rigoureuse à notre problématique.

La **première partie** sera consacrée au cadre conceptuel de notre étude. Nous y détaillerons le contexte réglementaire de Solvabilité II, les spécificités des produits d'épargne vie et les principes fondamentaux de la modélisation économique via les Générateurs de Scénarios Économiques (GSE).

La **deuxième partie** se concentrera sur les principes de la Gestion Actif-Passif (ALM). Nous y décrirons l'architecture du modèle de projection utilisé, en explicitant la modélisation de l'actif, du passif et de leurs interactions.

La **troisième partie** adoptera une approche constructive en détaillant la méthodologie de création d'un générateur de portefeuilles de passifs réalistes. L'objectif est de produire des données synthétiques robustes pour les analyses futures, simulant divers profils de contrats et de produits.

La **quatrième partie** constituera le cœur méthodologique de ce mémoire. Elle présentera le protocole d'analyse comparative des différentes méthodes d'agrégation (clustering, approches déterministes), en définissant les critères de sélection pour retenir l'approche la plus pertinente.

Enfin, la **cinquième partie** présentera et interprétera les résultats de nos simulations. À travers des analyses de sensibilité approfondies sur les indicateurs de Solvabilité 2, nous quantifierons l'impact de la méthode d'agrégation retenue sur la mesure du risque, validant ainsi la pertinence de l'approche simplifiée.

Le secteur de l'assurance vie en France est confronté à une mutation structurelle induite par la remontée des taux d'intérêt, qui met sous pression la compétitivité des fonds en euros et complexifie la gestion actif-passif (ALM). Dans ce contexte, les assureurs s'appuient sur des modèles de projection ALM sophistiqués pour piloter leur bilan et respecter les exigences du cadre réglementaire Solvabilité II. C'est de la rencontre entre ces exigences et les contraintes opérationnelles observées en entreprise qu'est née la problématique de ce mémoire.

0.1 Contexte professionnel et genèse de la problématique chez Accenture

Mon année en alternance au sein des équipes actuarielles d'Accenture m'a plongé au cœur de ces enjeux stratégiques. Ma mission principale a été de participer activement au développement et à l'industrialisation d'un modèle ALM propriétaire, entièrement programmé en Python. Cet outil, destiné à réaliser des projections et des simulations de bilans assurantiels, est conçu pour être à la fois robuste, flexible et performant.

Au cours de ce développement, nous avons été directement confrontés à énormément de contraintes opérationnelles dont le temps de calcul. L'exploration de stratégies multiples, la réalisation de sensibilités aux chocs réglementaires ou l'évaluation de nouvelles offres produits nécessitent un grand nombre de simulations. Or, la granularité fine des portefeuilles de passifs, bien que garantissant une précision maximale, engendre des temps de calcul prohibitifs qui peuvent freiner l'agilité et la prise de décision stratégique. Ce défi technique, vécu au quotidien, a été le point de départ de ma réflexion et constitue le fondement de ce mémoire. Les outils développés durant cette expérience, notamment le modèle ALM et un générateur de portefeuilles synthétiques, seront le socle technique sur lequel reposeront toutes les analyses de cette étude.

0.2 Problématique et objectifs du mémoire

L'optimisation des temps de calcul des modèles ALM est un enjeu de premier plan pour les compagnies d'assurance. Une des pistes explorées pour parvenir à améliorer les temps de calcul est la simplification ou l'agrégation des portefeuilles de passifs. Cependant, une telle démarche soulève une question fondamentale, qui constitue la problématique centrale de ce mémoire :

Dans quelle mesure est-il possible d'agréger des portefeuilles de passifs en assurance vie pour optimiser les temps de simulation, sans dénaturer la mesure des indicateurs de risque et de valeur prudentiels issus du cadre Solvabilité II ?

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire poursuit un double objectif. D'une part, il s'agira de tester et de comparer rigoureusement plusieurs méthodes d'agrégation, en partant de portefeuilles de contrats générés grâce à un générateur de contrats développé dans le cadre de ce mémoire. D'autre part, nous chercherons à quantifier précisément l'impact de ces agrégations sur des indicateurs clés tels que le Best Estimate (BE), le Solvency Capital Requirement (SCR) et la Present Value of Future Profits (PVFP). L'enjeu est de déterminer s'il existe un niveau d'agrégation optimal qui préserve la signification économique des résultats tout en offrant un gain de performance substantiel.

Pour mener à bien cette analyse, ce mémoire s'articulera en quatre parties. La **première** posera le cadre conceptuel de Solvabilité II et de la modélisation ALM. La **deuxième** décrira l'environnement de simulation et les outils développés. La **troisième** se concentrera sur l'étude des différentes techniques d'agrégation. Enfin, la **quatrième** partie présentera et analysera les résultats des sensibilités menées sur les portefeuilles agrégés afin de répondre à notre problématique.

Chapitre 1

Contexte réglementaire et modélisation en assurance vie

1.1 Les spécificités des produits d'assurance vie épargne

1.1.1 Principes fondamentaux du contrat d'assurance vie

L'assurance vie est une convention par laquelle un assureur, en contrepartie du versement de primes, s'engage à verser un capital ou une rente à la survenance d'un événement incertain lié à la durée de la vie humaine. Cet événement, qui constitue l'aléa au cœur du contrat, peut être le décès de l'assuré avant une date donnée ou, à l'inverse, sa survie jusqu'à cette date. Ce mécanisme repose sur un cycle de production inversé : l'assureur perçoit les primes bien avant de devoir potentiellement régler les prestations, ce qui l'amène à investir ces sommes sur des horizons de temps longs pour honorer ses engagements futurs.



FIGURE 1.1 – Cycle de production inversé en assurance vie (**graphique temporelle**)

La nature de ces engagements répond à des objectifs variés. Les contrats en cas de vie prévoient le versement d'un capital ou d'une rente à une échéance prévue si l'assuré est en vie ; ils sont typiquement utilisés pour se constituer un complément de retraite ou une épargne de précaution. À l'opposé, les contrats en cas de décès garantissent le versement d'un capital ou d'une rente au(x) bénéficiaire(s) désigné(s) au décès de l'assuré, souvent pour protéger des proches ou anticiper des droits de succession. Il existe également des contrats mixtes qui combinent ces deux garanties.

Le fonctionnement de ces contrats repose sur la capitalisation : les primes versées sont investies pour financer la propre couverture future de l'assuré. De par leur nature, ces engagements s'étendent sur de très longues périodes, conférant au passif de l'assureur une durée élevée, souvent supérieure à huit ans notamment pour des questions de fiscalité.

Une caractéristique fondamentale de l'assurance vie française est sa liquidité. L'assuré dispose de la possibilité de récupérer son épargne à tout moment via un rachat, qui peut être partiel ou total. Cette faculté de rachat constitue une option dont la valeur et le risque doivent être finement gérés par l'assureur,

car son exercice a un impact direct sur la duration et les besoins de liquidité du portefeuille. La fiscalité joue un rôle incitatif majeur, les plus-values étant imposées plus lourdement si le rachat intervient avant la huitième année du contrat, encourageant ainsi l'épargne de long terme.

1.1.2 Les principaux supports d'investissement

L'épargne des assurés peut être investie sur deux principaux types de supports aux profils de risque distincts, qui peuvent être combinés au sein de différents types de contrats.

Le **fonds en euros** est le support historique et sécuritaire de l'assurance vie française. Le risque financier y est intégralement porté par l'assureur, qui s'appuie sur une politique d'investissement prudente, majoritairement orientée vers des actifs obligataires. La sécurité de ce support repose sur un ensemble de garanties contractuelles et réglementaires :

- **La garantie du capital** : C'est la garantie la plus fondamentale. L'assureur garantit à tout moment le capital net investi par l'épargnant. Quelle que soit l'évolution des marchés financiers, la somme initialement versée (nette de frais) ne peut pas diminuer.
- **Le taux technique** : Il s'agit d'un taux de revalorisation minimal garanti sur toute la durée du contrat. Fixé à la souscription, il est aujourd'hui très faible, voire nul, en raison des contraintes réglementaires, mais il a joué un rôle important dans les contrats plus anciens.
- **Le Taux Minimum Garanti (TMG)** : Plus courant aujourd'hui que le taux technique, le TMG est un taux de rendement minimal que l'assureur s'engage à verser pour l'année à venir. Il est fixé annuellement et permet à l'assureur d'ajuster sa politique de rendement.
- **L'effet cliquet** : Ce mécanisme assure que les intérêts générés chaque année sont définitivement acquis. Une fois distribués, ils s'ajoutent au capital garanti et produisent à leur tour des intérêts les années suivantes. Il est impossible de revenir sur les revalorisations passées.
- **La Participation aux Bénéfices (PB)** : L'assureur a l'obligation légale de redistribuer aux assurés une partie significative de ses bénéfices financiers et techniques. Cette participation constitue la majeure partie du rendement annuel, au-delà du TMG. Pour lisser les performances, une partie de cette PB peut être mise en réserve dans une *Provision pour Participation aux Bénéfices* (PPB) que nous appellerons *Provision pour Participations aux Excedents* (PPE) dans la suite de ce mémoire. La PPE doit être reversée aux assurés dans un délai de huit ans au maximum.

Les **unités de compte (UC)** offrent une exposition directe aux marchés financiers. Contrairement aux fonds en euros, le risque d'investissement est entièrement porté par l'assuré. L'assureur ne garantit pas la valeur du capital, mais un nombre de parts d'actifs (OPCVM, actions, SCPI, etc.). La valeur de l'épargne fluctue ainsi au gré des marchés, offrant un potentiel de rendement supérieur à long terme, mais exposant également à un risque de perte en capital. Pour l'assureur, ce support est plus simple à gérer car il n'implique pas de garanties financières particulières.

Ces supports sont proposés via deux grandes familles de contrats. Les contrats monosupports permettent

d'investir sur un seul type de fonds (soit en euros, soit en UC). Les contrats multisupports sont les plus répandus, quant à eux, combinent au moins un fonds en euros et plusieurs supports en unités de compte, permettant à l'épargnant de répartir son investissement selon son profil de risque. Dans le cadre de cette étude, le portefeuille analysé se compose de contrats multisupports avec une répartition représentative du marché français, soit approximativement 60% en fonds euros et 40% en unités de compte.

	Ensemble		Euros		Unités de compte ²	
	En Md€	Var.	En Md€	Var.	En Md€	Var.
Cotisations	174,9	+14,7 %	108,6	+19,2 %	66,3	+8,1 %
Prestations	146,4	-3,1 %	113,3	-5,5 %	33,1	+6,4 %
Collecte nette	+28,5	+27,1 Md€	-4,7	+24,1 Md€	+33,2	+3,0 Md€
Encours	+1 985,8	+3,9 %	+1 398,6	+1,4 %	+587,1	+10,3 %
dont provisions mathématiques	+1932,2	+4,4 %	+1345,0	+2,0 %	+587,1	+10,3 %
dont provision pour participation aux bénéfices	+53,6	-11,1 %	+53,6	-11,1 %	n.a.	n.a.

FIGURE 1.2 – Le marché de l'assurance vie en France en 2024 (graphique temporaire)

1.1.3 Contexte économique et enjeux actuels

La gestion de ces produits d'épargne est devenue particulièrement complexe dans l'environnement économique récent. Après une longue période de taux d'intérêt historiquement bas, le secteur de l'assurance a dû s'adapter à un nouveau paradigme marqué par une volatilité accrue et des taux durablement plus élevés.

Cette transition a mis les assureurs en difficulté. Leurs portefeuilles obligataires, constitués en grande partie d'anciennes obligations à faible rendement, présentent une forte inertie. Face à ce stock historique, il leur est difficile de générer des rendements suffisants pour offrir des taux de revalorisation attractifs sur les fonds en euros, capables de concurrencer les nouveaux produits de marché. Cet enjeu de compétitivité, couplé aux exigences de rentabilité et de solvabilité, place la gestion actif-passif au cœur des problématiques actuelles, justifiant pleinement l'introduction du cadre réglementaire qui suit.

1.2 Le cadre prudentiel Solvabilité II

Entrée en vigueur le 1er janvier 2016, la directive Solvabilité II constitue la norme prudentielle européenne pour la quasi-totalité des assureurs et réassureurs de l'Union Européenne. Son objectif principal est d'harmoniser les pratiques du secteur, d'assurer une protection optimale des assurés et de garantir que les compagnies puissent honorer leurs engagements en toutes circonstances. Pour ce faire, elle instaure une approche économique et prospective, fondée sur une évaluation fine des risques et structurée en trois piliers interdépendants.

1.2.1 L'approche stochastique et la valorisation économique

Un des fondements de Solvabilité II est sa méthode de valorisation des engagements. Pour comprendre la rupture introduite par la norme, il est essentiel de distinguer deux approches complémentaires : déterministe et stochastique.

- **L'approche déterministe** est un outil de pilotage. Elle repose sur une projection unique des variables économiques (courbe des taux, performance des actions, etc.). Bien qu'insuffisante pour la valorisation prudentielle, elle demeure un outil fondamental pour l'assureur. Sa simplicité en fait un instrument privilégié pour l'élaboration du *business plan*, la définition des budgets et la communication d'un scénario central. Elle permet également de réaliser des analyses de sensibilité claires et interprétables. Sa limite principale est son incapacité à valoriser les risques asymétriques.
- **L'approche stochastique** est un outil de valorisation. Pour pallier la limite précédente, cette approche explore un grand nombre de futurs possibles. Elle s'appuie sur un **Générateur de Scénarios Économiques (GSE)** dont je parlerai plus pleinement dans la fin de ce chapitre. Cet outil sert à produire des ensembles de simulations cohérentes (1000 dans le cadre de cette étude). La valeur d'un indicateur est alors obtenue en calculant la moyenne des résultats sur l'ensemble de ces scénarios, une méthode dite de Monte-Carlo. Cette exploration de multiples futurs est indispensable pour quantifier le coût réel des garanties optionnelles (Taux Minimum Garanti, options de rachat, etc.), qui se matérialise principalement dans les scénarios extrêmes.

La différence de valeur entre le résultat de ces deux approches est capturée par le concept de **TVOG** (*Time Value of Options and Guarantees*). En imposant une approche stochastique, Solvabilité II assure une valorisation *market-consistent*, ou "en juste valeur", des engagements complexes, reflétant le coût réel des options et garanties embarquées dans les contrats.

1.2.2 Le Pilier 1 : Exigences quantitatives

Le Pilier 1 définit les règles de calcul des provisions techniques et du capital de solvabilité. Il introduit la notion de Bilan Prudentiel, une vision économique du bilan comptable où les actifs et les passifs sont évalués de manière cohérente avec leur valeur de marché.

1.2.2.1 Le Bilan Prudentiel Solvabilité II

Le bilan prudentiel se structure de la manière suivante :

- **Les Actifs**, qui sont comptabilisés à leur **Valeur de Marché (VM)**.
- **Les Provisions Techniques**, qui représentent la valeur des engagements de l'assureur envers ses assurés. Elles se décomposent en deux parties : le *Best Estimate* et la Marge de Risque.
- **Les Fonds Propres Prudentiels**, aussi appelés **NAV (Net Asset Value)**, qui constituent la richesse de l'assureur. Ils sont définis par la différence entre la valeur des actifs et celle des engagements : $NAV = VM_{Actifs} - (BE + RM)$.

1.2.2.2 Les Provisions Techniques (BE et RM)

Le **Best Estimate (BE)**, ou *Best Estimate Liability (BEL)*, représente la meilleure estimation de la valeur actuelle des flux de trésorerie futurs liés aux engagements d'assurance. Son calcul est réalisé sur un horizon de temps long (40-60 ans) dans l'hypothèse d'un portefeuille en extinction (*run-off*), c'est-à-dire sans l'ajout de nouveaux contrats. Il est obtenu par la moyenne des flux actualisés sur un grand nombre de simulations économiques stochastiques en univers risque neutre :

$$BEL = \mathbb{E}^Q \left[\sum_{j=1}^T CF(j) \cdot e^{-\int_0^j r(s)ds} \right] \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T \frac{CF_i(j)}{(1 + r_{i,j})^j} \quad (1.1)$$

Où N est le nombre de simulations, T l'horizon de projection, $CF_i(j)$ le flux de trésorerie net de l'année j pour la simulation i , et $r_{i,j}$ le taux d'actualisation sans risque pertinent. Le BE se subdivise en *Best Estimate Garanti (BEG)* pour les engagements contractuels minimaux et en *Future Discretionary Benefits (FDB)* pour la part de participation aux bénéfices future et discrétionnaire.

La **Marge de Risque (Risk Margin - RM)** s'ajoute au Best Estimate. Elle correspond au coût qu'un autre assureur exigerait pour reprendre le portefeuille de passif, rémunérant ainsi l'immobilisation du capital nécessaire pour couvrir les risques non-financiers jusqu'à leur extinction. Elle est calculée selon une approche "Coût du Capital" (*Cost of Capital - CoC*) :

$$RM = CoC_{rate} \times \sum_{j=0}^T \frac{SCR_{non-fi}(j)}{(1 + r_{j+1})^{j+1}} \quad (1.2)$$

Où CoC_{rate} est le coût du capital (fixé à 6%), et $SCR_{non-fi}(j)$ est la part du SCR couvrant les risques non-financiers à l'année j .

BILAN ECONOMIQUE SOUS SOLVABILITE II		
Actifs	Fonds propres	Capital excédentaire
		SCR
		MCR
	Provisions techniques	Risk Margin
		Best Estimate

FIGURE 1.3 – Bilan économique sous Solvabilité II

1.2.2.3 Les Exigences de Capital (SCR et MCR)

Solvabilité II définit deux niveaux d'exigence de capital.

Le **Solvency Capital Requirement (SCR)** est le montant de fonds propres nécessaire pour faire face à une perte inattendue et sévère, calibré pour correspondre à une **Value-at-Risk (VaR)** à **99,5%** à un horizon d'un an. En cas de non-respect, l'assureur fait l'objet d'un suivi renforcé par le régulateur (l'ACPR en France). En formule standard, son calcul suit une approche modulaire. Pour un risque élémentaire x , le SCR est la perte de NAV résultant d'un choc calibré :

$$SCR_x = NAV_{\text{central}} - NAV_{\text{choc}} \quad (1.3)$$

Pour les risques de passif purs (mortalité, rachat), la formule se simplifie en une variation de Best Estimate ($SCR_{\text{passif}} = \Delta BE$). Les SCR des risques élémentaires sont ensuite agrégés à l'aide de matrices de corrélation pour former le SCR final.

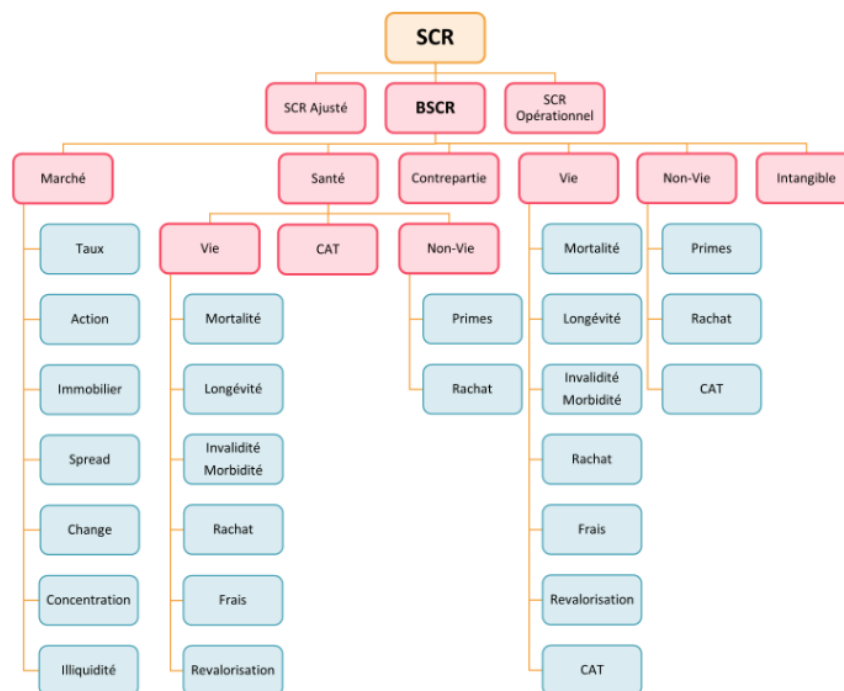


FIGURE 1.4 – Schéma des modules et sous-modules du SCR en Formule Standard

Le **Minimum Capital Requirement (MCR)** est le seuil minimal absolu de fonds propres. Si la NAV de l'assureur tombe en dessous de ce seuil, son agrément peut lui être retiré. Le MCR agit comme un dernier filet de sécurité.

1.2.3 Le Pilier 2 : Exigences qualitatives et gouvernance

Ce pilier se concentre sur la supervision, la gestion des risques et la gouvernance interne. Il impose aux assureurs de mettre en place un **système de gouvernance** sain, prudent et proportionné. Cela inclut une structure organisationnelle transparente, des politiques écrites claires, et un système de contrôle interne robuste. La direction doit être assurée par au moins deux dirigeants effectifs (**principe des 4 yeux**) qui doivent répondre à des exigences de compétence et d'honorabilité (*fit and proper*).

Ce système s'articule autour de quatre **fonctions clés** indépendantes : la fonction actuarielle, la gestion des risques, l'audit interne et la conformité.

L'élément central du Pilier 2 est l'**ORSA** (*Own Risk and Solvency Assessment*). Il s'agit d'un processus interne par lequel l'assureur évalue, sur un horizon de 3 à 5 ans, l'adéquation entre son profil de risque spécifique, ses limites de tolérance et ses besoins globaux en solvabilité. C'est un outil de pilotage stratégique qui permet d'aller au-delà des hypothèses standards pour refléter la stratégie propre de l'entreprise.

1.2.4 Le Pilier 3 : Exigences de reporting et transparence

Le Pilier 3 vise à assurer la transparence et l'harmonisation de l'information financière à destination du public et des autorités de contrôle. Il définit les rapports et leur fréquence de production (annuelle et trimestrielle).

Les documents clés incluent :

- Le **SFCR** (*Solvency and Financial Condition Report*) : un rapport public annuel sur la solvabilité et la situation financière. Ils ont été particulièrement utiles dans ce mémoire pour illustrer la situation financière des assureurs et avoir des données cohérentes.
- Le **RSR** (*Regular Supervisory Report*) : un rapport narratif détaillé et confidentiel, à destination du superviseur.
- Le **QRT** (*Quantitative Reporting Templates*) : des rapports quantitatifs standardisés remis périodiquement.
- Les **ENS** (*États Nationaux Spécifiques*) : des rapports additionnels demandés par le régulateur local.
- Le **rapport ORSA** : le document confidentiel issu du processus ORSA du Pilier 2.

1.3 Les Générateurs de Scénarios Économiques (GSE)

Le Générateur de Scénarios Économiques (GSE) est un outil mathématique central dans la modélisation stochastique. Il a pour fonction de simuler de multiples trajectoires futures pour les principales variables financières (taux d'intérêt, performance des actions, inflation, etc.). La qualité des projections ALM dépendant directement de la robustesse du GSE, il est nécessaire de distinguer deux cadres de modélisation qui coexistent.

Bien que ces deux univers soient complémentaires, la réglementation Solvabilité II assigne à chacun un rôle très précis pour le calcul des différents indicateurs prudentiels. Le tableau suivant synthétise cette répartition des tâches.

TABLE 1.1 – Répartition des calculs Solvabilité II par univers de projection

Univers Risque Neutre (Q)	Univers Monde Réel (P)
Indicateurs du Pilier 1 : <ul style="list-style-type: none"> — Best Estimate Liability (BEL) — Marge de Risque (RM) — Solvency Capital Requirement (SCR) — Bilan Prudentiel et NAV 	Exercices du Pilier 2 : <ul style="list-style-type: none"> — ORSA (Own Risk and Solvency Assessment) — Business Plan et planification stratégique — Test de la pérennité du modèle
Finalité : Valorisation <i>Market-Consistent</i> à un instant t.	Finalité : Pilotage stratégique et prospectif.

La distinction entre ces deux approches est donc fondamentale : l'une sert à valoriser, l'autre à piloter. Les sections suivantes détaillent les modèles mathématiques sous-jacents à chaque univers.

1.3.1 L'univers Risque Neutre (Q) : un cadre pour la valorisation

L'univers **Risque Neutre (Q)** est un cadre de valorisation théorique, requis par Solvabilité II pour les calculs *market-consistent*. Son objectif n'est pas de prédire l'évolution réelle des marchés, mais de calculer la valeur « juste » d'un actif ou d'un passif à la date de calcul, en se fondant sur les prix de marché observés. Dans cet univers, on postule que tous les investisseurs sont indifférents au risque, ce qui implique que le rendement espéré de n'importe quel actif est égal au taux d'intérêt sans risque. Cette construction, fondée sur l'absence d'opportunité d'arbitrage, est indispensable pour valoriser de manière cohérente les options et garanties complexes des contrats d'assurance. La valeur V_0 d'un flux de trésorerie futur CF_T est alors son espérance mathématique sous cette probabilité risque neutre, actualisée au taux sans risque $r(s)$:

$$V_0 = \mathbb{E}^Q \left[CF_T \cdot e^{-\int_0^T r(s) ds} \right] \quad (1.4)$$

Cet univers constitue le fondement du Pilier 1 de Solvabilité II, utilisé pour le calcul du Best Estimate Liability (BEL) et du Solvency Capital Requirement (SCR).

1.3.1.1 Modélisation des taux d'intérêt : le modèle de Hull & White

Pour les taux d'intérêt, le modèle de **Hull & White à un facteur** est une référence dans le cadre réglementaire. Son principal avantage est sa capacité à se calibrer parfaitement à la courbe des taux sans risque initiale, telle que fournie par l'EIOPA.

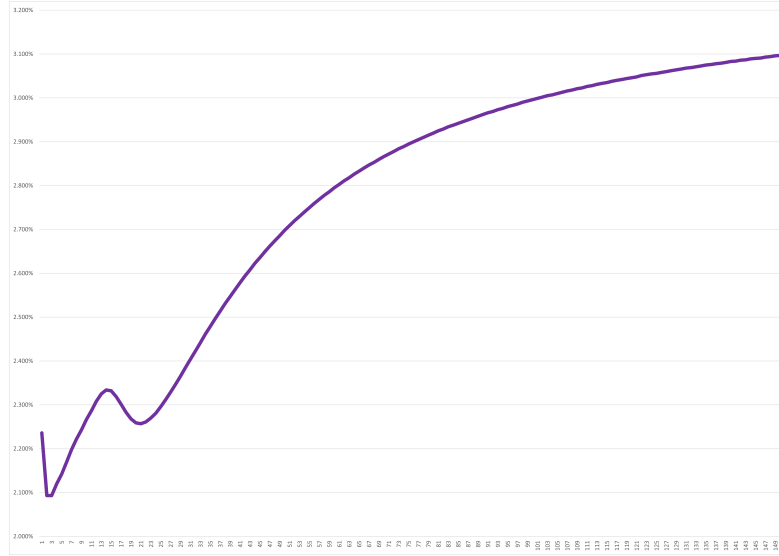


FIGURE 1.5 – Courbe des taux sans risque sans *Volatility Adjustment* au 31/12/2024 publiée par l'EIOPA

Cette flexibilité est obtenue grâce à un paramètre de retour à la moyenne $\theta(t)$ qui dépend du temps. Son équation différentielle stochastique (EDS) s'écrit :

$$dr_t = (\theta(t) - ar_t)dt + \sigma dW_t^{\mathbb{Q}} \quad (1.5)$$

où r_t est le taux d'intérêt court, a la vitesse de retour à la moyenne, σ la volatilité et $W_t^{\mathbb{Q}}$ un mouvement brownien sous la mesure risque neutre. Pour des raisons de calcul, nous utilisons la solution discrète de cette EDS :

$$r_{t+h} = r_t e^{-ah} + \theta(t+h) - \theta(t)e^{-ah} + \sigma \sqrt{\frac{1 - e^{-2ah}}{2a}} Z \quad (1.6)$$

1.3.1.2 Modélisation des actions et de l'immobilier : le modèle de Black & Scholes

Pour les actifs risqués comme les actions ou l'immobilier, le modèle de **Black & Scholes** est couramment utilisé. Conformément à la logique risque neutre, le rendement espéré (la dérive du processus) est le taux sans risque r_t . L'EDS du prix de l'actif S_t est :

$$dS_t = r_t S_t dt + \sigma S_t dW_t^{\mathbb{Q}} \quad (1.7)$$

où S_t est le prix de l'actif, r_t le taux sans risque et σ la volatilité de l'actif. La solution de cette EDS est donnée par :

$$S_t = S_0 \exp \left(\int_0^t \left(r_s - \frac{\sigma^2}{2} \right) ds + \int_0^t \sigma dW_s^{\mathbb{Q}} \right) \quad (1.8)$$

En pratique, on utilise sa solution discrétisée pour simuler les trajectoires de prix sur un pas de temps h :

$$S_{t+h} = S_t \exp \left(\left(r_t - \frac{\sigma^2}{2} \right) h + \sigma \sqrt{h} Z \right) \quad (1.9)$$

où Z est une variable aléatoire suivant une loi normale centrée réduite $\mathcal{N}(0, 1)$.

1.3.2 L'univers Monde Réel (\mathbb{P}) : un outil de pilotage stratégique

À l'inverse, l'**univers Monde Réel** (\mathbb{P}) vise à générer des scénarios réalistes pour refléter une évolution plausible des marchés. Son objectif est la projection et la planification stratégique, notamment pour l'exercice ORSA (Pilier 2) ou l'optimisation de l'allocation d'actifs. La différence fondamentale avec l'univers risque neutre réside dans l'introduction d'une prime de risque pour rémunérer la volatilité supportée par les investisseurs. Le rendement espéré d'un actif risqué est donc supérieur au taux sans risque :

$$\mathbb{E}^{\mathbb{P}}[\text{Rendement de l'actif}] = \text{Taux sans risque} + \text{Prime de risque} \quad (1.10)$$

Cette prime est calibrée à partir d'analyses prospectives, de données historiques et de d'avis d'expert sur le marché.

1.3.2.1 Modélisation des taux d'intérêt : le modèle de Vasicek

Dans l'univers monde réel, le modèle de **Vasicek** est souvent préféré pour sa parcimonie et son interprétation économique. Il modélise un retour des taux courts r_t vers une moyenne de long terme constante b , ce qui correspond à une vision économique plus stable. Son EDS est :

$$dr_t = a(b - r_t)dt + \sigma dW_t^{\mathbb{P}} \quad (1.11)$$

où a est la vitesse de retour à la moyenne, b la moyenne de long terme du taux, σ sa volatilité et $W_t^{\mathbb{P}}$ un mouvement brownien sous la mesure monde réel. La solution de cette EDS est :

$$r_t = r_0 e^{-at} + b(1 - e^{-at}) + \sigma \int_0^t e^{-a(t-s)} dW_s^{\mathbb{P}} \quad (1.12)$$

Pour calibrer ces modèles, les données choisies en entrée sont typiquement des séries temporelles historiques : Euribor 3 mois pour les taux courts, l'indice des OAT 10 ans pour les taux longs, les cotations de l'IEIF pour l'immobilier et l'EuroStoxx pour les actions.

1.3.2.2 Modélisation des actions et de l'immobilier : le modèle de Black & Scholes avec prime de risque

Le modèle de Black & Scholes est également utilisé, mais sa dérive est modifiée pour inclure la prime de risque. Le rendement espéré μ est désormais une constante supérieure au taux sans risque moyen : $\mu > r$. L'EDS devient :

$$dS_t = \mu S_t dt + \sigma S_t dW_t^{\mathbb{P}} \quad (1.13)$$

La solution de cette EDS est le fameux mouvement brownien géométrique :

$$S_t = S_0 \exp \left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2} \right) t + \sigma W_t^{\mathbb{P}} \right) \quad (1.14)$$

1.3.3 Synthèse des deux univers

Le tableau suivant résume les caractéristiques et les usages des deux univers de projection. Si l'univers risque neutre \mathbb{Q} répond à la question « *Combien vaut cet engagement aujourd'hui ?* », l'univers monde réel \mathbb{P} répond à « *Quelle sera ma situation financière demain ?* ».

TABLE 1.2 – Synthèse comparative des univers de projection

Critère	Univers Risque Neutre (\mathbb{Q})	Univers Monde Réel (\mathbb{P})
Objectif	Valorisation <i>Market-Consistent</i> (Pilier 1 : BEL, SCR). Calculer une valeur juste à $t = 0$.	Projection stratégique (Pilier 2 : ORSA, Business Plan). Simuler des futurs plausibles.
Rendement Espéré (Actifs risqués)	Taux sans risque (r_t). Aucune prime de risque.	Taux sans risque + Prime de risque ($\mu = r + \text{prime}$).
Modèle de Taux Typique	Hull & White . Flexible, calibré à la courbe des taux initiale.	Vasicek . Économique, retour à une moyenne de long terme.
Calibration	Calibré sur les prix des instruments financiers actuels (courbe des taux, volatilités implicites).	Calibré sur des données historiques et des anticipations d'experts (primes de risque).

Pour la suite de ce mémoire, je vais me concentrer sur l'univers risque neutre \mathbb{Q} , car il est le plus pertinent pour les calculs prudentiels et la gestion Actif-Passif dans le cadre de Solvabilité II.

1.4 La représentation du passif : le concept de *Model Point*

1.4.1 La nécessité de l'agrégation

Les portefeuilles d'assurance vie comptent souvent des centaines de milliers, voire des millions de polices. Une modélisation "police à police" est techniquement possible mais informatiquement irréalisable pour des calculs stochastiques complexes comme ceux requis par les modèles ALM. La charge de calcul deviendrait prohibitive. La simplification du portefeuille de passif n'est donc pas un choix, mais une contrainte opérationnelle fondamentale.

La réponse standard à cette contrainte est la création de *Model Points* (MP). Un MP est un contrat synthétique représentant un agrégat de polices partageant des caractéristiques homogènes. L'objectif est de réduire drastiquement le volume de données à traiter tout en préservant les propriétés actuarielles et financières essentielles du portefeuille complet. La qualité de la représentation dépend directement de la pertinence des critères de regroupement (caractéristiques du produit, de l'assuré, du contrat), souvent optimisés par des techniques de classification statistique (*clustering*).

1.4.2 Les impacts de l'agrégation en MP sur les indicateurs S2

L'utilisation des *Model Points* constitue la méthode standard pour agréger le passif et rendre les modèles ALM opérationnels. Cependant, la manière dont ces groupes de contrats sont formés à partir des polices individuelles a un impact direct et significatif sur la valorisation des indicateurs réglementaires et leur sensibilité aux chocs.

La problématique centrale de ce mémoire est donc d'optimiser cette étape fondamentale de l'agrégation. En partant du portefeuille granulaire "police à police", nous cherchons à définir, comparer et tester différentes méthodes de regroupement pour créer des *Model Points*. L'objectif est de construire une méthodologie de simplification optimale, c'est-à-dire celle qui minimise l'erreur d'agrégation tout en garantissant la plus grande stabilité des indicateurs Solvabilité II (SCR, Marge de Risque, NAV) lors du calcul des différentes sensibilités. Cette section introductive pose donc les fondations de notre analyse : la simplification étant une nécessité, comment s'assurer que la méthode de regroupement choisie est la plus fidèle et la plus robuste possible ?

Chapitre 2

La Gestion Actif-Passif et le Modèle de Simulation en Python

2.1 Principes et Enjeux de la Gestion Actif-Passif (ALM)

La gestion Actif-Passif (ALM) trouve son origine dans une particularité fondamentale du secteur de l'assurance énoncé précédemment dans le mémoire : le **cycle de production inversé**. Contrairement à une entreprise classique qui vend un produit avant d'en percevoir le revenu, un assureur collecte des primes aujourd'hui en échange de la promesse de verser des prestations dans un futur lointain et incertain. Ce décalage temporel est au cœur du modèle économique de l'assurance vie.

Ce mécanisme engendre une inadéquation structurelle (*mismatch*) entre les deux côtés du bilan. D'une part, le passif est constitué d'engagements de longue durée, dont l'échéance et le montant sont soumis à des aléas (mortalité, comportement de rachat des assurés). D'autre part, pour couvrir ces engagements, l'assureur investit les primes sur les marchés financiers, constituant un actif dont la valeur et les flux sont, par nature, volatiles et dépendants du contexte économique.

Cette inadéquation est renforcée par une interdépendance dynamique et complexe entre l'actif et le passif.

- **Le passif influe sur l'actif** : Le versement des prestations (rachats, décès) contraint l'assureur à liquider une partie de ses actifs, parfois dans des conditions de marché défavorables.
- **L'actif influe sur le passif** : La performance des actifs financiers a un impact direct sur le niveau des engagements. C'est notamment le cas de la **Participation aux Bénéfices (PB)**, qui dépend des résultats financiers générés par l'assureur. Le Code des assurances impose une redistribution minimale aux assurés, calculée comme suit :

$$PB_{\min\text{Reg}} = 85\% \times \max(\text{RésFi}, 0) + \begin{cases} 90\% \times \text{RésTech} & \text{si } \text{RésTech} \geq 0 \\ 100\% \times \text{RésTech} & \text{si } \text{RésTech} < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Où le Résultat Financier (RésFi) est directement issu de la performance des actifs et le Résultat Technique (RésTech) des risques de mortalité et de rachat.

La gestion Actif-Passif est donc la discipline qui vise à piloter les risques nés de cette interdépendance afin d'assurer la solvabilité et d'optimiser la rentabilité de l'acteur.

2.1.1 La Modélisation ALM : un Outil de Projection Essentiel

Pour quantifier et piloter les risques complexes découlant de l'inadéquation actif-passif, les assureurs ont recours à des modèles de projection actuariels sophistiqués, communément appelés modèles de Gestion Actif-Passif ou modèles ALM. L'utilité principale de ces modèles est de projeter le bilan d'un assureur, qu'il s'agisse d'un bilan prudentiel sous Solvabilité 2 ou d'un bilan comptable sous les normes IFRS17, afin d'évaluer la santé financière future de l'organisme sur un horizon de long terme. Leur fonctionnement repose sur la combinaison de deux piliers fondamentaux : des scénarios prospectifs sur l'environnement économique et financier, et des hypothèses sur le comportement futur des assurés (lois de mortalité, de rachat, etc.).

L'approche de modélisation peut être déterministe ou stochastique, chaque approche répondant à des objectifs d'analyse distincts.

L'approche **déterministe** consiste à projeter le bilan de l'assureur selon une trajectoire unique et prédéfinie de l'environnement économique. Cette trajectoire, qualifiée de **scénario central**, est généralement construite à partir de la courbe des taux sans risque fournie par l'EIOPA. Elle permet d'obtenir le (*Best Estimate*) central, c'est à dire la somme des flux futurs actualisés du portefeuille dans un contexte économique considéré comme le plus probable, servant de base pour le plan d'affaires et la valorisation prudentielle.

Cependant, une approche déterministe ne peut à elle seule capturer l'éventail des risques, notamment ceux liés aux options et garanties financières (par exemple, les Taux Minimum Garantis ou les options de rachat) dont le coût ne se matérialise que dans des conditions de marché adverses. Pour pallier cette limite, une approche **stochastique** est nécessaire. Celle-ci s'appuie sur un **Générateur de Scénarios Économiques (GSE)** pour simuler un grand nombre (souvent plusieurs milliers) de trajectoires économiques futures possibles, chacune représentant une évolution plausible des marchés financiers.

Chaque scénario économique généré sert alors d'input pour une projection complète du modèle ALM. En agrégeant les résultats de ces multiples projections via la **méthode de Monte Carlo**, l'assureur obtient non plus une seule valeur, mais une distribution des résultats possibles. L'objectif final est de disposer, pour chaque trajectoire, du détail des flux financiers à la maille la plus fine. Cette granularité permet une analyse statistique approfondie des risques, comme le calcul de quantiles (Value at Risk à 99.5%) pour déterminer le capital de solvabilité requis (SCR) sous Solvabilité 2. Ces modèles stochastiques sont donc au cœur de l'évaluation des risques et de la prise de décision stratégique, et constituent le fondement du modèle de simulation qui sera détaillé dans la suite de ce chapitre.

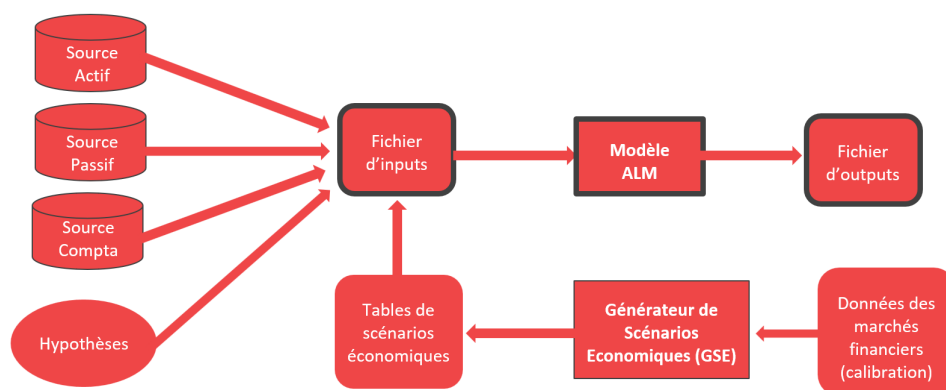


FIGURE 2.1 – Fonctionnement d'un modèle ALM (graphique temporel)

2.2 Architecture et Fonctionnement du Modèle de Projection

L'objectif de cette section est de détailler l'architecture et le séquençement des opérations du modèle ALM développé pour les besoins de cette étude. Le modèle a été conçu pour simuler de manière dynamique et séquentielle le bilan d'un assureur vie sur un horizon de projection pluriannuel.

Son fonctionnement global peut être décomposé en trois phases principales, comme illustré dans la figure 2.2 :

1. **Phase d'Initialisation** : Préparation et validation des données d'entrée, et application des choix réglementaires à la date de départ.
2. **Boucle de Projection Annuelle** : Cœur du modèle qui simule, année après année, l'évolution du bilan selon une séquence d'événements prédéfinis.
3. **Phase de Finalisation** : Calcul des indicateurs prudentiels et génération des résultats en fin de projection.

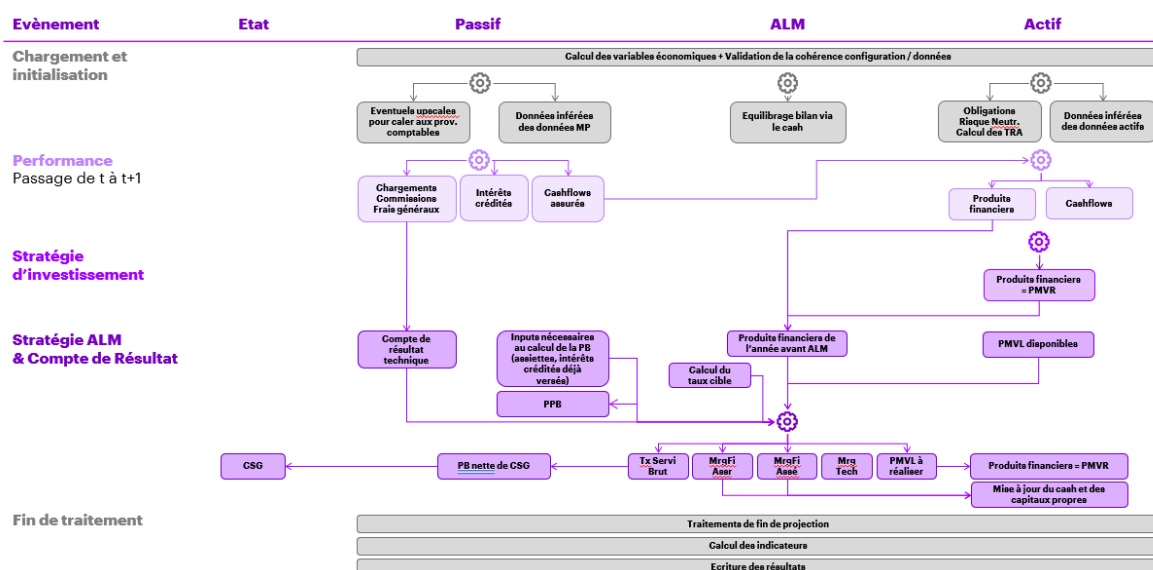


FIGURE 2.2 – Architecture générale et séquençement des événements du modèle ALM. (graphique temporaire)

2.2.1 Phase 1 : Initialisation du Modèle

Cette première phase prépare l'environnement de projection. Elle est elle-même divisée en trois sous-étapes.

2.2.1.1 Chargement et Validation des Données d'Entrée

Le modèle est alimenté par un ensemble de données exhaustif, regroupées en quatre catégories :

- **Données Économiques et Financières** : Issues du Générateur de Scénarios Économiques (GSE), elles comprennent les courbes de taux, les taux d'inflation et les performances des différentes classes d'actifs pour chaque scénario stochastique.
- **Portefeuille d'Actifs** : Les *model points* d'actifs représentant l'ensemble des placements de l'assureur (obligations à taux fixe et variable, actions et immobilier).
- **Portefeuille de Passifs** : Les *model points* d'épargne décrivant les engagements envers les assurés.
- **Hypothèses de Modélisation** : Un ensemble de tables paramétrant le comportement futur (stratégie d'investissement, stratégie ALM, règles de participation aux bénéfices, tables de mortalité, de rachat) et les chocs prudentiels Solvabilité 2.

Une étape de validation est systématiquement réalisée pour assurer la cohérence et la qualité des données chargées. Par exemple, nous vérifions qu'il n'y a pas de Provisions mathématiques négatives ou que la somme des taux d'affectation des différentes classes d'actifs est bien égale à 1.

2.2.1.2 Application des Chocs Solvabilité 2 en $t=0$

L'application des chocs instantanés en $t=0$ est une étape fondamentale du calcul du SCR (Solvency Capital Requirement) selon la formule standard de Solvabilité 2. L'objectif est de mesurer la résilience de l'assureur face à une série de scénarios de crise prédéfinis, calibrés pour représenter un événement se produisant une fois tous les 200 ans.

Pour chaque choc, le modèle crée un "axe analytique" : les données d'entrée sont dupliquées, puis les paramètres pertinents sont modifiés conformément au scénario de choc. La différence entre la valeur des fonds propres dans le scénario central (sans choc) et leur valeur dans le scénario choqué détermine le besoin en capital pour ce risque spécifique.

Les principaux chocs, ou modules de risque, se répartissent en plusieurs catégories :

- **Le risque de marché** : Il regroupe les risques liés aux fluctuations des marchés financiers.
 - **Choc de taux d'intérêt** : Simule une variation soudaine, à la hausse ou à la baisse, de la courbe des taux d'intérêt. Ce choc a un impact majeur sur la valeur des actifs (notamment les obligations) et des passifs (qui sont actualisés avec cette courbe des taux).
 - **Choc actions** : Modélise une baisse brutale des marchés actions. La formule standard distingue généralement deux types de chocs actions (Type 1 et Type 2) en fonction de la nature et de la diversification des investissements. Par exemple, un choc de -33.84% pourrait s'appliquer à un portefeuille d'actions diversifié.

- **Choc immobilier** : Représente une chute de la valeur du marché immobilier. Le paramètre de -25% est une valeur standard pour ce type de risque.
- **Choc de spread** : Concerne le risque de crédit sur les obligations et les prêts. Il simule un élargissement des spreads de crédit, ce qui diminue la valeur de marché de ces actifs.
- **Le risque de souscription vie** : Il est lié aux aléas inhérents à l'activité d'assurance vie.
 - **Choc de mortalité** : Simule une augmentation soudaine et permanente du taux de mortalité (par exemple, +15%). Ce choc est particulièrement impactant pour les contrats de prévoyance où l'assureur doit verser un capital en cas de décès.
 - **Choc de longévité** : À l'inverse, il modélise une baisse permanente du taux de mortalité (les assurés vivent plus longtemps que prévu). Ce risque affecte principalement les rentes viagères, pour lesquelles l'assureur doit verser des prestations plus longtemps.
 - **Choc de rachat** : Simule une variation massive et soudaine du comportement des assurés en matière de rachat de leurs contrats. Il se décline en trois sous-modules : une hausse des taux de rachat, une baisse, et un scénario de rachat de masse (catastrophique).
 - **Choc de dépenses** : Modélise une augmentation imprévue des frais de gestion de l'assureur, combinée à une hausse de l'inflation de ces frais.
 - **Choc de catastrophe** : Concerne les événements extrêmes, comme une pandémie, entraînant une augmentation brutale et temporaire de la mortalité (par exemple, une hausse de 0.15 points de pourcentage du taux de mortalité sur une année).

2.2.1.3 Préparation à la Boucle de Projection

Enfin, les tables de données sont préparées pour la projection en y ajoutant les dimensions d'analyse fondamentales : le **scénario économique**, la **période de projection** (l'année) et l'**événement** intra-annuel.

2.2.2 Phase 2 : La Boucle de Projection Annuelle

Le cœur du modèle est une boucle itérative qui projette le bilan année par année. Pour chaque pas de temps, trois événements clés sont modélisés séquentiellement.

2.2.2.1 Événement 1 : Performance

Cette première étape simule le "passage du temps" sans intervention active du management.

- **Côté Passif** : Les engagements évoluent sous l'effet des flux biométriques (décès), comportements (rachats), et contractuels (arrangements de rente). La provision mathématique est revalorisée en

appliquant les Taux Minimums Garantis (TMG) pour les fonds euros et la performance des marchés pour les Unités de Compte (UC).

- **Côté Actif** : La valeur des actifs est mise à jour pour refléter la performance des marchés. Les revenus (coupons, dividendes) sont encaissés et alimentent la trésorerie.

2.2.2.2 Événement 2 : Stratégie d'Investissement

Cette étape modélise les décisions de gestion financière. L'algorithme simule la politique d'investissement en cherchant à maintenir une allocation d'actifs cible. En fonction de la trésorerie disponible, le modèle arbitre entre les différentes classes d'actifs, générant des ordres d'achats et de ventes.

2.2.2.3 Événement 3 : Stratégie ALM et Clôture du Compte de Résultat

C'est l'étape finale de l'exercice annuel, qui vise à équilibrer le bilan.

1. **Détermination du Résultat Financier** : Le modèle agrège l'ensemble des produits financiers générés.
2. **Application de la Stratégie de Participation aux Bénéfices (PB)** : Le modèle calcule la PB à distribuer, en respectant les contraintes réglementaires et en visant un taux cible. Il peut activer des leviers comme la reprise de la Provision pour Participation aux Excédents (PPE) ou la réalisation de plus-values latentes.
3. **Clôture des Comptes** : Le résultat technique et financier sont finalisés pour établir le compte de résultat et s'assurer de l'équilibre du bilan de clôture.

2.2.3 Phase 3 : Finalisation et Génération des Outputs

Une fois la boucle achevée pour toutes les années et tous les scénarios, le modèle entre dans sa phase finale.

2.2.3.1 Calcul des Indicateurs Prudentiels

Le principal objectif est de calculer le **Best Estimate (BE)** des passifs. Pour chaque scénario, le modèle agrège les flux de passifs futurs et les actualise en utilisant les courbes de taux sans risque correspondantes. La moyenne des BE sur l'ensemble des scénarios fournit la valeur centrale, tandis que la distribution permet de calculer le capital de solvabilité requis (SCR).

2.2.3.2 Génération des Rapports de Sortie

Enfin, le modèle produit un ensemble de rapports détaillés (similaires aux QRTs réglementaires) présentant les bilans projetés, les comptes de résultat, la décomposition du BE et du SCR, et d'autres indicateurs clés pour l'analyse actuarielle.

2.3 Limites Actuelles du modèle

A date, les fonds propres ne sont pas modélisés dans le modèle ALM. En effet, le modèle se concentre sur la projection de l'actif et du passif, ainsi que sur les interactions entre les deux, mais n'intègre pas encore la dynamique des fonds propres. Cette limitation est importante car les fonds propres jouent un rôle crucial dans la solvabilité et la résilience financière de l'assureur. Leur modélisation permettrait de mieux évaluer l'impact des stratégies de gestion sur la solidité financière globale de l'entreprise. L'absence des fonds propres nous empêche de calculer des indicateurs cruciaux tels que le ratio de solvabilité.

Chapitre 3

Construction d'un Générateur de Portefeuilles de Passifs Réaliste

3.1 Objectifs Stratégiques et Contraintes Techniques

La capacité à tester la robustesse des modèles et la pertinence des analyses de sensibilité repose sur un prérequis fondamental : la disponibilité de données de passif variées et réalistes. Pour un cabinet de conseil, où l'accès aux portefeuilles des clients n'est pas systématique, la faculté de générer des portefeuilles synthétiques, mais représentatifs du marché, constitue un atout stratégique majeur. C'est dans ce contexte qu'un générateur de portefeuilles de passifs a été conçu et développé dans le cadre de ce mémoire.

Ce chapitre a pour vocation de présenter cet outil essentiel. Nous détaillerons les besoins stratégiques et analytiques auxquels il répond, la méthodologie de génération retenue, les contraintes techniques rencontrées et les données qui ont été utilisées pour rendre le portefeuille le plus réaliste possible.

Pour l'instant ce chapitre n'est pas encore terminé, le générateur de portefeuilles de passifs n'étant pas encore finalisé, voici une partie temporaire le présentant avec des remarques réalisées dans le but d'améliorer le générateur ainsi que la qualité de ce chapitre dans le mémoire. C'est un chapitre crucial car c'est ici que seront introduites les données sur lesquelles les analyses seront basées.

3.1.1 Définition du générateur de portefeuilles de passifs

Un générateur de portefeuille de passifs est un outil logiciel conçu pour créer, de manière algorithmique, des ensembles de données synthétiques qui imitent avec réalisme des portefeuilles de contrats d'assurance-vie. Plutôt que de s'appuyer sur des données réelles, souvent confidentielles ou indisponibles, cet outil simule les caractéristiques fondamentales des assurés (âge, sexe, etc.) et de leurs contrats (type de produit, montant de la provision mathématique, date de souscription, etc.).

L'objectif n'est pas de produire des données aléatoires, mais de générer un portefeuille dont les propriétés statistiques — distributions, corrélations, tendances — sont indiscernables de celles d'un portefeuille réel. Il s'agit d'une brique essentielle pour l'analyse quantitative en actuariat, permettant de surmonter les contraintes d'accès aux données. Le développement d'un tel outil s'est imposé comme une nécessité pour plusieurs raisons stratégiques et analytiques, tant pour un cabinet de conseil, qui peut ainsi tester ses modèles sans données client, que pour un organisme d'assurance souhaitant explorer des scénarios prospectifs et évaluer l'impact de nouvelles offres.

3.1.2 Besoins métiers : simulation de nouveaux produits et analyse concurrentielle

Pour un acteur du secteur de l'assurance, qu'il s'agisse d'un assureur ou d'un cabinet de conseil, la capacité à modéliser et à anticiper les dynamiques de marché est un avantage concurrentiel décisif. Le générateur de portefeuilles de passifs répond directement à ce besoin en fournissant un support quantitatif pour la prise de décision stratégique, notamment dans trois domaines clés : le lancement de nouveaux produits, l'orientation du *business mix* et l'analyse concurrentielle.

Premièrement, le lancement d'un nouveau produit d'assurance-vie représente un investissement et un risque significatifs. Avant toute commercialisation, il est impératif d'en évaluer rigoureusement les impacts sur le profil de risque et la rentabilité de l'entreprise. Le générateur offre un véritable laboratoire virtuel pour ce faire. En simulant l'intégration de milliers de polices conformes aux caractéristiques du nouveau produit (garanties, frais, options), il permet de projeter leur comportement dans le temps. Il devient alors possible d'analyser leur effet sur les indicateurs prudentiels de Solvabilité II, tels que le *Best Estimate* (BE) et le besoin en capital (*Solvency Capital Requirement* - SCR), mais aussi d'évaluer leur sensibilité à divers chocs de marché (hausse des taux, krach boursier) ou de comportement (vagues de rachats). Cet outil permet ainsi de tester, d'ajuster et d'optimiser les caractéristiques d'un produit pour atteindre le couple rendement/risque désiré avant même sa mise sur le marché.

Deuxièmement, le générateur est un outil précieux pour piloter la stratégie à long terme de l'entreprise. La direction peut être amenée à vouloir faire évoluer son *business mix*, c'est-à-dire la répartition de son portefeuille entre différents types de produits (fonds en euros, unités de compte, prévoyance...). Par exemple, dans un contexte de taux bas persistants, un assureur pourrait vouloir accélérer sa transition vers les produits en unités de compte. Le générateur permet de quantifier les implications d'une telle stratégie. En simulant des portefeuilles futurs correspondant à ces nouvelles orientations commerciales, la direction peut visualiser les conséquences sur le bilan, la rentabilité prévisionnelle, mais aussi sur la consommation de capital et l'exposition aux risques. Ces simulations éclairent les décisions stratégiques et s'intègrent naturellement dans des exercices prospectifs comme l'ORSA (*Own Risk and Solvency Assessment*).

Enfin, la capacité à se positionner par rapport à ses concurrents est fondamentale. Faute d'accès aux portefeuilles détaillés des autres acteurs, un assureur doit s'appuyer sur des reconstitutions. En se basant sur des données publiques (rapports annuels, publications réglementaires comme les SFCR) ou des statistiques sectorielles, le générateur peut créer un portefeuille "moyen" représentatif du marché, ou simuler le portefeuille probable d'un concurrent spécifique. Ces portefeuilles synthétiques deviennent alors une base solide pour des analyses comparatives (*benchmarking*). Ils permettent non seulement d'évaluer la performance relative, mais aussi de comparer les profils de risque, d'anticiper les stratégies concurrentes et d'identifier les meilleures pratiques du marché. Il convient toutefois de souligner les limites d'une telle démarche. Une analyse ALM complète et réaliste d'un concurrent ne peut se contenter de la seule modélisation du passif. Elle exigerait également de simuler son portefeuille d'actifs et de disposer d'informations précises sur ses ressources financières et ses fonds propres. Or, ces données, qui relèvent du secret des affaires, sont rarement publiques. Par conséquent, l'analyse comparative reste nécessairement partielle, se concentrant sur les caractéristiques intrinsèques du portefeuille de passifs reconstitué.

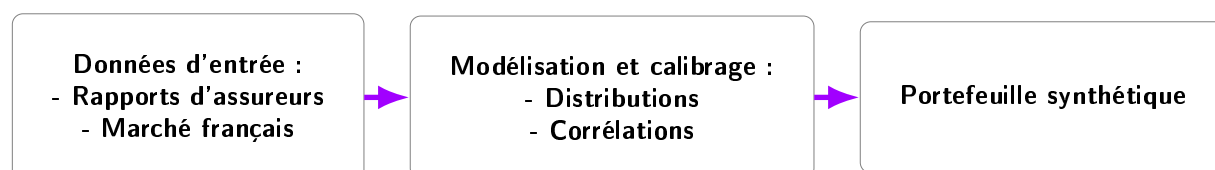


FIGURE 3.1 – Schéma de la méthodologie de génération d'un portefeuille de passifs synthétique.

3.1.3 Défis de la modélisation : réalisme, volumétrie et flexibilité

La conception et la mise en œuvre d'un générateur de portefeuilles de passifs efficace soulèvent trois défis majeurs et interdépendants : le réalisme des données générées, la gestion de la volumétrie et la flexibilité de l'outil.

Le premier défi, et le plus fondamental, est celui du réalisme. Il ne s'agit pas de produire des données aléatoires, mais de créer un portefeuille synthétique dont les propriétés statistiques sont indiscernables de celles d'un portefeuille réel. Cela implique non seulement de reproduire fidèlement les distributions de chaque caractéristique individuelle (âge, montant, etc.), mais aussi, et surtout, de capturer les corrélations complexes qui les lient. Par exemple, l'âge d'un assuré est souvent corrélé au type de produit souscrit et au montant de sa provision mathématique. Ignorer ces dépendances conduirait à un portefeuille incohérent, dont le comportement sous différents scénarios de risque serait erroné, invalidant ainsi les analyses prudentielles ou stratégiques qui en découlent.

Le deuxième défi est celui de la volumétrie. Les portefeuilles d'assurance-vie des grands acteurs du marché se comptent en centaines de milliers, voire en millions de contrats. Le générateur doit être capable de produire des ensembles de données de cette ampleur de manière performante, c'est-à-dire dans un temps de calcul raisonnable et sans consommer une quantité prohibitive de ressources mémoire. Cette contrainte de performance est d'autant plus forte que la gestion des corrélations, nécessaire au réalisme du portefeuille, ajoute une complexité de calcul significative. En effet, la modélisation des dépendances entre variables (par exemple, via des méthodes comme les copules) est intrinsèquement plus coûteuse en ressources que la simple génération de variables indépendantes. Il faut donc trouver un équilibre entre la sophistication statistique et la performance, ce qui a des implications directes sur les choix technologiques et algorithmiques, écartant les solutions naïves au profit d'approches optimisées pour le traitement de données massives.

Enfin, le troisième défi est la flexibilité. Un générateur ne serait que d'une utilité limitée s'il ne produisait qu'un seul type de portefeuille statique. Pour répondre aux besoins métiers variés, l'outil doit être hautement paramétrable. L'utilisateur doit pouvoir ajuster finement les caractéristiques du portefeuille à générer : définir les spécificités d'un nouveau produit, modifier les distributions statistiques pour simuler un segment de marché différent, ou encore changer les lois de comportement (rachat, mortalité) pour tester de nouvelles hypothèses. Cette flexibilité est la clé qui transforme le générateur en un véritable laboratoire d'expérimentation pour les actuaires et les stratèges.

3.2 Méthodologie de Génération et Modélisation Statistique

La méthodologie de génération du portefeuille de passifs synthétique est au cœur de notre démarche. Elle vise à construire un ensemble de contrats d'assurance dont les propriétés statistiques sont entièrement maîtrisées, en s'appuyant sur une approche stochastique. Le principe fondamental consiste à modéliser chaque caractéristique d'un contrat (âge de l'assuré, montant de la provision, etc.) comme une variable aléatoire tirée d'une loi de probabilité calibrée sur des données de marché.

3.2.1 Approche stochastique par lois de probabilité

Le cœur du générateur de passifs repose sur la modélisation de chaque attribut d'un contrat d'assurance via une loi de probabilité spécifique. Ce processus permet de créer une population de polices hétérogène et réaliste, dont la diversité est essentielle pour une simulation ALM pertinente. La génération s'effectue en deux temps : d'abord, la définition de "produits types" ou archétypes, puis la génération des contrats individuels à partir de ces archétypes. *Note pour moi-même : Le concept d'archétypes est une bonne idée, mais je dois le rendre plus concret. Je devrais définir précisément ce que c'est, combien j'en ai créé et sur quelle base (ex : "fonds en euros sécuritaire", "mixte dynamique", "pur UC"). Un tableau récapitulatif des archétypes et de leurs caractéristiques serait une excellente addition pour clarifier ce point.*

Les caractéristiques de ces profils (par exemple, les fourchettes de Taux Minimum Garanti (TMG), les montants moyens de provision mathématique) sont elles-mêmes générées aléatoirement à l'aide de lois uniformes, discrètes ou continues. Cette première étape permet de fixer les méta-paramètres (tels que la moyenne μ , l'écart-type σ , ou les bornes $[min, max]$) qui régiront la génération fine des contrats. *Note pour moi-même : Attention, ce passage est confus. Est-ce que je tire les paramètres des archétypes aléatoirement ? Si c'est le cas, je dois justifier cette couche de stochasticité. Sinon, si les paramètres sont fixés par des hypothèses expertes, je dois le dire clairement. Je devrais reformuler en précisant que "Les paramètres définissant chaque archétype (fourchettes de TMG, etc.) sont déterminés en amont..." pour plus de clarté.*

Chaque contrat individuel est ensuite instancié en tirant ses variables selon des lois de probabilité spécifiques, reflétant la nature de la caractéristique modélisée :

- **Nombre de polices par agrégat :** Modélisé par une loi de Poisson $\mathcal{P}(\lambda)$, tronquée pour assurer une valeur minimale de 1. *Note pour moi-même : Je dois justifier le choix de la loi de Poisson. C'est un choix classique, mais je dois expliquer pourquoi je l'ai fait (ex : grand nombre de clients potentiels, faible probabilité de souscription). Je dois aussi préciser comment le paramètre lambda est calibré. Pour la "troncature à 1", je dois être plus précis mathématiquement. Est-ce que j'utilise une loi de Poisson tronquée en zéro (Zero-Truncated Poisson) ? Si oui, je devrais donner la fonction de masse correspondante.*

- **Sexe de l'assuré :** Modélisé par une loi de Bernoulli $\mathcal{B}(p)$, où p représente la proportion d'hommes définie dans les spécifications du produit. *Note pour moi-même : C'est un choix standard. Je dois juste préciser d'où vient le paramètre p . Est-ce que je l'ai tiré des données de marché, des statistiques nationales (INSEE), ou est-ce une hypothèse propre au produit cible ?*
- **Montants des provisions (fonds euros et UC) :** Tirés selon une loi Normale $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$, dont les paramètres sont issus des spécifications. Les valeurs générées sont ensuite tronquées pour rester dans des bornes prédéfinies, afin d'éviter les valeurs aberrantes. *Note pour moi-même : Le choix de la loi Normale pour des montants est discutable. Une loi Lognormale ou Gamma serait peut-être plus adaptée. Je dois justifier ce choix. Ai-je fait des tests d'ajustement (Kolmogorov-Smirnov, etc.) sur des données réelles ? Je dois aussi détailler la troncature : quelles bornes $[\min, \max]$ et comment ont-elles été choisies ? Je dois vérifier si j'ai bien tenu compte de l'impact de la troncature sur la moyenne et la variance pour que les moments finaux correspondent aux cibles.*
- **Allocation d'actifs cible :** Les poids cibles pour chaque classe d'actifs (actions, immobilier, etc.) sont également générés suivant des lois Normales. Un mécanisme de normalisation est ensuite appliqué pour garantir que la somme des allocations $\sum_i \omega_i$ pour un contrat donné est égale à 1. *Note pour moi-même : Même remarque que pour les provisions. La normalisation post-tirage modifie les lois marginales. Une approche plus rigoureuse serait d'utiliser une loi de Dirichlet. Je devrais mentionner cette alternative et justifier pourquoi je ne l'ai pas utilisée (par exemple, pour des raisons de simplicité).*
- **Date d'effet du contrat :** Générée par une loi Uniforme continue sur un intervalle de temps $[T_{\text{début}}, T_{\text{fin}}]$. *Note pour moi-même : C'est un choix simple. Je dois le justifier brièvement. Est-ce que l'hypothèse d'une souscription uniforme dans le temps est réaliste pour mon cas ? Je pourrais mentionner que d'autres lois comme Beta ou Triangulaire pourraient mieux modéliser des pics de souscription.*

3.2.2 Calibration des distributions marginales à partir des données de marché

L'approche stochastique adoptée n'est pas purement aléatoire; elle est rigoureusement calibrée pour refléter une réalité de marché ou un portefeuille cible. La calibration des distributions marginales de chaque variable est assurée principalement via un ensemble de spécifications qui définissent les paramètres des lois de probabilité. Ces spécifications peuvent être obtenues de deux manières complémentaires :

1. **Calibration par hypothèses expertes :** Les paramètres des lois (moyennes, écarts-types, bornes) sont définis sur la base d'hypothèses actuarielles et économiques. Cette méthode est utilisée pour explorer des scénarios de marché spécifiques ou pour concevoir des produits cibles. *Note pour moi-même : Ce paragraphe est trop vague, il faut que je le rende plus concret avec des exemples précis.*
2. **Calibration directe sur données réelles :** Les spécifications peuvent être issues d'une analyse statistique d'un portefeuille existant. Les paramètres des lois sont alors les estimateurs directs des moments empiriques (moyenne, variance) observés sur les données, garantissant que le portefeuille

synthétique réplique fidèlement la structure du portefeuille réel. *Note pour moi-même : C'est le point le plus faible de la section, je dois absolument le renforcer. Je dois décrire précisément la source de données utilisée (portefeuille réel anonymisé ? taille ? période ?). Je dois expliquer la méthode d'estimation (méthode des moments ou maximum de vraisemblance ? Pourquoi ce choix ?). Surtout, je dois ajouter la validation statistique : quels tests d'ajustement (goodness-of-fit) ai-je utilisés (Chi-deux, K-S) et quels sont les résultats (p-valeurs) ? Des graphiques comparant l'histogramme des données réelles et la densité de la loi calibrée sont indispensables ici.*

Un exemple particulièrement abouti de cette calibration est la modélisation de la distribution des âges des assurés. Le processus charge une distribution d'âge de référence, représentative de la population cible. Cette distribution est ensuite transformée en une série de lois de probabilité conditionnelles : pour chaque âge maximum possible à la souscription, n , une distribution de probabilité discrète, tronquée à n , est calculée. *Note pour moi-même : C'est un bon exemple, mais je dois être plus précis. Quelle est la "distribution d'âge de référence" ? Table de mortalité réglementaire, données INSEE ? Je dois citer la source exacte. Je devrais aussi décrire le processus mathématiquement. Si $f(x)$ est la densité de référence, la densité conditionnelle est $f_{X|X \leq n}(x) = \frac{f(x)}{\int_0^n f(t)dt}$. Montrer cette formule prouverait ma maîtrise du sujet.* Lors de la génération, l'âge d'un assuré pour un contrat donné est tiré au hasard en utilisant la distribution de probabilité conditionnelle qui respecte l'âge maximum autorisé pour ce produit. Cette méthode garantit que la structure démographique du portefeuille généré est cohérente avec celle de la population de référence.

3.2.3 Perspective : modélisation des dépendances par la théorie des copules

Note pour moi-même : Cette partie devrait plutôt aller dans une conclusion pour donner une ouverture à mon sujet de mémoire Une limite inhérente au modèle actuel est l'hypothèse d'indépendance entre les différentes caractéristiques des contrats. Par exemple, le montant de la provision mathématique est généré indépendamment de l'âge de l'assuré, ce qui est une simplification forte de la réalité. Pour dépasser cette limite, une évolution naturelle du modèle consisterait à intégrer la théorie des copules pour modéliser la structure de dépendance entre les variables aléatoires.

La force de l'approche par copules réside dans sa capacité, via le théorème de Sklar, à séparer la modélisation des distributions marginales de celle de leur structure de dépendance. Il serait ainsi possible de conserver la calibration fine de chaque marge, décrite précédemment, tout en introduisant une structure de corrélation réaliste. La mise en œuvre suivrait les étapes suivantes :

1. **Définition de la structure de dépendance** : Spécification d'une matrice de corrélation (par exemple, de Spearman ou de Kendall) entre les variables d'intérêt, comme l'âge, l'ancienneté du contrat et le montant des provisions. *Note pour moi-même : C'est une bonne perspective. Pour la renforcer, je devrais expliquer comment je calibrerais cette matrice de corrélation (estimation à partir des rangs sur les données réelles ?). Je pourrais aussi préciser que le choix entre Spearman et Kendall n'est pas anodin.*
2. **Choix d'une famille de copules** : Sélection d'une copule (Gaussienne, de Student, ou archimédienne comme celles de Clayton ou Gumbel) en fonction de la nature des dépendances à modéliser, notamment la symétrie ou la dépendance aux extrêmes (risques de queue). *Note pour moi-même :*

Parfait. Pour aller plus loin, je pourrais donner un exemple concret : "Par exemple, pour modéliser le fait que les assurés les plus âgés ont tendance à avoir les plus grosses provisions (dépendance dans la queue supérieure), une copule de Gumbel serait plus appropriée qu'une copule Gaussienne." Cela montrerait une compréhension plus fine.

3. **Modification du processus de génération :** Le tirage des variables ne se ferait plus de manière indépendante. Il faudrait d'abord générer des vecteurs de variables uniformes corrélées à partir de la copule choisie. Ensuite, par la méthode de la transformée inverse, appliquer la fonction de répartition inverse de chaque loi marginale calibrée ($F_X^{-1}(u)$) pour obtenir les réalisations des variables finales. *Note pour moi-même : Je dois réfléchir à la faisabilité d'appliquer réellement cette méthode dans le cadre du mémoire.*

Cette extension permettrait d'enrichir considérablement le réalisme du portefeuille synthétique, en capturant des phénomènes clés tels que la tendance des assurés plus âgés à détenir des contrats avec des provisions plus élevées, améliorant ainsi la pertinence des simulations ALM subséquentes.

3.3 Présentation de l'Outil et du Portefeuille de Référence Généré

3.3.1 Architecture de l'application en Python et choix technologiques

3.3.2 Description des paramètres d'entrée et des formats de sortie

3.3.3 Analyse descriptive du portefeuille de référence

Chapitre 4

Protocole d'Analyse : Sélection d'une Méthode d'Agrégation

Ce chapitre a pour objectif de définir et de mettre en œuvre un protocole d'analyse rigoureux visant à sélectionner la méthode d'agrégation la plus adaptée à notre étude. Le choix s'appuiera sur une évaluation comparative de plusieurs approches candidates, en considérant des critères clés tels que la fidélité des indicateurs prudentiels (BE et SCR), la performance en termes de temps de calcul et la complexité de mise en œuvre.

La démarche consistera d'abord à présenter les différentes méthodes d'agrégation envisagées. Ensuite, nous appliquerons chacune de ces méthodes à un portefeuille de référence afin de quantifier les écarts de résultats par rapport à une modélisation sans agrégation.

À l'issue de cette analyse comparative, la méthode jugée la plus performante sera retenue. Elle sera ensuite utilisée pour conduire les analyses de sensibilité détaillées dans le chapitre suivant.

4.1 Présentation des Méthodes d'Agrégation candidates

4.1.1 Approches par clustering (K-means, DBSCAN/HDBSCAN)

4.1.2 Autres approches (MP par âge, MP Mémoire Amine Ben Fadhel, etc.)

4.2 Définition du Protocole de Test Comparatif

4.2.1 Constitution des portefeuilles de test

4.2.2 Définition des critères de sélection : fidélité des indicateurs (BE/SCR), performance et temps de calcul

4.3 Analyse Comparative et Choix de la Méthode Optimale

4.3.1 Synthèse des performances pour chaque méthode candidate

4.3.2 Justification du choix de la méthode retenue pour l'analyse de sensibilité

Chapitre 5

Analyse de Sensibilité des Indicateurs S2 aux Caractéristiques du Passif

Le but de ce chapitre est de tester la robustesse de la méthode d'agrégation sélectionnée au chapitre 4. Pour ce faire, des chocs (réglementaires + autres) seront appliqués sur des portefeuilles de test générés via le générateur présenté au chapitre 3. L'objectif est d'analyser l'impact de ces chocs sur les indicateurs S2 (BE, SCR) en comparant les résultats obtenus sur les portefeuilles granulaires (sans agrégation) et les portefeuilles agrégés (avec la méthode d'agrégation retenue). Cette analyse permettra de vérifier que la méthode d'agrégation choisie préserve la sensibilité des indicateurs aux variations des caractéristiques du passif, assurant ainsi la fiabilité des analyses de risque et de solvabilité dans un contexte d'optimisation computationnelle.

5.1 Définition des Scénarios de Sensibilité

5.1.1 Création des portefeuilles de test via le générateur

5.1.2 Description des chocs sur les variables clés (âge, montant de la PM, etc.)

5.1.3 Scénario d'intégration d'un nouveau produit dans le portefeuille

5.2 Analyse de l'Impact de l'Agrégation sur la Mesure des Chocs

- 5.2.1 Comparaison des indicateurs S2 sur portefeuilles choqués granulaires et agrégés
- 5.2.2 Analyse de la fidélité de la méthode d'agrégation à retranscrire la sensibilité

5.3 Interprétation des Résultats et Validation de l'Approche

- 5.3.1 Validation de la performance de la chaîne de modélisation (Générateur - Agrégation - Modèle ALM)**
- 5.3.2 Enseignements sur la sensibilité des portefeuilles aux modifications de caractéristiques du passif**

Chapitre 6

Conclusion

6.1 Résumé des résultats

6.1.1 Synthèse des principaux résultats obtenus

6.1.2 Impact des méthodes d'agrégation sur les portefeuilles de passifs

6.2 Perspectives d'amélioration

- 6.2.1 Axes d'amélioration pour les générateurs de portefeuilles de passifs
- 6.2.2 Évolutions possibles des méthodes d'agrégation et de modélisation ALM
- 6.2.3 Autres domaines d'application des générateurs de portefeuilles de passifs

6.3 Conclusion Générale et Perspectives

Ce mémoire, présenté ici dans sa version intermédiaire, dresse le bilan d'une première phase de recherche consacrée à la construction d'un cadre méthodologique et au développement des outils de modélisation. Les résultats quantitatifs finaux ne sont pas encore établis à ce stade, la priorité ayant été donnée à l'élaboration d'un socle technique robuste. Cette conclusion a donc pour double vocation de définir avec précision la feuille de route pour la finalisation des travaux et de présenter un bilan synthétique des compétences clés acquises chez Accenture, qui ont été déterminantes pour ce projet.

6.3.1 Perspectives et Finalisation des Travaux de Recherche

Le modèle ALM sous Python, désormais opérationnel, constitue la pierre angulaire de l'analyse à venir. Les prochaines étapes seront dédiées à son exploitation intensive afin de répondre à la problématique du mémoire. Les axes de travail prioritaires sont les suivants :

- **Analyse Comparative et Critique des Méthodes d'Agrégation** : Une investigation approfondie de plusieurs méthodes d'agrégation de portefeuilles sera menée. Au-delà d'une simple application mécanique, il s'agira de disséquer les fondements théoriques de chaque approche, leurs hypothèses et leur incidence sur la mesure de la diversification des risques. Une attention particulière sera portée à la **robustesse** des méthodes, c'est-à-dire leur capacité à produire des indicateurs agrégés stables et convergents, y compris sous des conditions de marché dégradées ou lors de variations des hypothèses de modélisation.
- **Enrichissement du Générateur de Portefeuilles de Passifs** : La crédibilité des résultats repose sur le réalisme des simulations. Le générateur de portefeuilles sera donc affiné pour intégrer des structures de dépendance plus sophistiquées entre les variables clés (âge des assurés, montant des provisions mathématiques, comportement de rachat, etc.). Cette évolution permettra de simuler des portefeuilles plus fidèles à la réalité d'un assureur et de tester la résilience de nos conclusions dans des scénarios adverses.
- **Conduite d'une Campagne d'Analyses de Sensibilité** : Une fois les méthodologies d'agrégation validées, une série de tests de sensibilité sera déployée. En appliquant les chocs réglementaires prévus par Solvabilité 2 (choc taux, actions, mortalité, rachat), nous vérifierons la stabilité des agrégations et quantifierons leur impact sur le Solvency Capital Requirement (SCR). L'objectif final est d'offrir une vision claire de la manière dont l'agrégation modifie et stabilise le profil de risque d'un portefeuille.

La feuille de route pour la finalisation du mémoire est clairement établie et s'inscrit dans la continuité logique des travaux déjà réalisés. Les parties non encore écrites ont un plan clair et détaillé qui montre la robustesse de l'approche. La maîtrise des outils et des concepts acquise jusqu'à présent me permet d'aborder cette dernière phase avec une grande confiance. Une planification rigoureuse et une exécution méthodique assureront l'achèvement des analyses et la rédaction finale dans les délais impartis.

6.3.2 Bilan de l'expérience professionnelle chez Accenture : un levier pour le mémoire

Mon année en alternance chez Accenture a été une expérience fondatrice, m'offrant un cadre idéal pour développer les compétences techniques indispensables à la réalisation de ce mémoire.

6.3.2.1 Développement et industrialisation d'un modèle ALM en Python

Au cœur de mes missions se trouvait le développement d'un modèle ALM (Asset-Liability Management) entièrement programmé en Python. Sous la supervision d'un Manager, j'ai pu assimiler les meilleures pratiques de l'ingénierie logicielle appliquée à l'actuariat. Cela inclut la gestion de projet via **Git**, un système de contrôle de version essentiel pour le travail collaboratif et le suivi rigoureux des modifications du code. J'ai également mis en place des batteries de tests unitaires, notamment via des interfaces avec Excel, pour garantir la fiabilité et la cohérence des résultats du modèle à chaque itération.

Ce socle technique m'a permis de mener à bien des projets complexes, comme la transformation du modèle ALM développé en un modèle de projection de passifs de retraite. Cette adaptation a exigé une refonte profonde de la logique de modélisation du passif, consolidant ainsi ma compréhension des mécanismes actuariels. J'ai par ailleurs conçu et développé un générateur de portefeuilles de passifs, un outil stratégique pour Accenture afin de réaliser des tests de performance et de résistance sur le modèle.

6.3.2.2 Développement d'un modèle de passifs sociaux sous Python

Dans le cadre de mon alternance chez Accenture, j'ai eu l'opportunité de recréer un logiciel calculant des passifs sociaux en Python. Les passifs sociaux sont des engagements financiers liés aux prestations sociales, tels que les retraites ou les indemnités de départ à la retraite que les entreprises doivent provisionner. Ce projet m'a permis de mettre en pratique mes compétences en programmation tout en approfondissant ma compréhension des enjeux actuels liés à la gestion des ressources humaines et à la prévoyance sociale.

Ce logiciel a été conçu pour être modulable et facilement intégrable dans les systèmes existants des clients d'Accenture, facilitant ainsi son adoption. J'ai également veillé à ce qu'il soit accompagné d'une documentation complète, permettant aux utilisateurs de comprendre rapidement son fonctionnement et de l'utiliser efficacement pour des futures missions sur ce sujet.

6.3.2.3 Maîtrise d'un écosystème technique moderne

Cette immersion professionnelle m'a permis de maîtriser un environnement de développement avancé. J'ai travaillé quotidiennement sous **Linux**, un système d'exploitation open-source prisé pour sa stabilité et sa sécurité, qui est le standard dans de nombreux environnements de calcul scientifique et de serveurs. J'ai également acquis une compétence sur **Docker**, une technologie de conteneurisation. Un conteneur est une sorte de "boîte" logicielle qui embarque une application et toutes ses dépendances, garantissant ainsi qu'elle s'exécute de manière identique et fiable, quel que soit l'ordinateur ou le serveur sur lequel elle est déployée.

6.3.2.4 Expertise en gestion de données et en calcul distribué (Cloud)

La manipulation de grands volumes de données est au cœur des problématiques actuarielles modernes. J'ai pu renforcer mes compétences en utilisant des bibliothèques Python de haute performance comme **Polars** pour le traitement de données et **Xlwings** pour automatiser les interactions entre Python et Excel. Mon apprentissage le plus significatif fut la prise en main de **Snowflake**, une plateforme de données hébergée dans le cloud. Snowflake permet non seulement de stocker et de requêter d'énormes jeux de données via le langage SQL, mais aussi d'exploiter sa puissance de calcul massive pour exécuter des scripts Python, comme le modèle ALM, directement sur la plateforme, optimisant ainsi drastiquement les temps de traitement et les besoins en ressources.

6.3.2.5 Collaboration, autonomie et transmission des savoirs

Au-delà des aspects purement techniques, j'ai appris à évoluer au sein d'une équipe projet agile, en participant à des réunions de suivi quotidiennes. J'ai également eu la responsabilité de former plusieurs nouveaux collaborateurs, à la fois sur le fonctionnement technique du modèle ALM et sur les bonnes pratiques de développement à adopter. Cette expérience de transmission a été extrêmement formatrice, renforçant mes capacités de communication et de vulgarisation de concepts complexes.



Annexes

Bibliographie

- [1] DORNAIKA Fadi, HAMAD Denis, CONSTANTIN Joseph, TRONG HOANG Vinh. *Advances in Data Clustering*. Lieu d'édition : Springer, 2024.
- [2] GOFFARD Pierre-Olivier, GUERRAULT Xavier. « Is it optimal to group policyholders by age, gender, and seniority for BEL computations based on model points? ». *European Actuariel Journal*, volume 5, 17 Avril 2015, p. 165-180.
- [3] BEN FADHEL Amine. « Accélération de l'évaluation de la solvabilité prospective d'un assureur épargne ». *Mémoire pour l'Institut des Actuaire*s , 2022.
- [4] FRANCE ASSUREURS. *L'assurance vie en 2023*. (20 septembre 2024). Consulté le 1er Septembre 2025, sur <https://www.franceassureurs.fr/nos-chiffres-cles/assurance-vie/etude-statistique-assurance-vie-2023/>