

Mémoire présenté le :

**pour l'obtention du Diplôme Universitaire d'actuariat de l'ISFA
et l'admission à l'Institut des Actuaires**

Par : Adrien MONTESINOS

**Titre : Modélisation de produits vie et optimisation de performances dans un
cadre international et multinorme**

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 Actuaires*

.....
.....
.....

Entreprise : addactis Software

Nom :

Signature :

*Directeur de mémoire en entre-
prise :*

Nom : Janick JEMINET

Nom : Thomas BOURDIN

Signature :

*Membres présents du jury de
l'ISFA*

.....
.....
.....

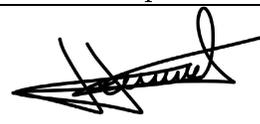
Invité :

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



Mémoire d'Actuaire

Modélisation de produits vie et optimisation de performances dans un cadre international et multinorme

Adrien MONTESINOS

Tuteur académique :
Alexis BIENVENÜE

Tuteur d'entreprise :
Janick JEMINET
Thomas BOURDIN

31/03/2024

Table des matières	
Résumé	6
Abstract	7
Remerciements	8
Notes de synthèse	9
Summary	14
Introduction	19
I Contexte	20
1 Solvabilité 2 et IFRS 17 : Le poids des normes	21
1.1 Introduction à Solvabilité 2	21
1.1.1 Les objectifs de S2	21
1.1.2 Pilier 1 : Un coût opérationnel élevé	22
1.1.3 Pilier 2 : Une modélisation plus poussée	25
1.1.4 Pilier 3 : Les rapports réglementaires	26
1.2 Introduction à IFRS 17	29
1.2.1 Contexte et Justification	29
1.2.2 Fonctionnement	30
1.2.3 Le coût opérationnel de la modélisation	32
1.2.4 Les états financiers	33
1.3 Processus de reporting : un temps difficilement compressible	35
1.3.1 Les étapes du processus	35
1.3.2 Le poids des reportings	37
1.3.3 Le multinorme accroît la complexité	37
2 Contexte d'entreprise	39
2.1 addactis Group : une entreprise internationale	39
2.2 addactis Software : Développement de modèles pour l'international	40
2.3 Méthodologie de gestion de projet	40

II	La bibliothèque <i>Life Cash Flows</i>	42
3	Présentation de la bibliothèque <i>LCF</i>	43
3.1	Les produits modélisés	43
3.1.1	L'assurance décès temporaire	43
3.1.2	La rente viagère Immédiate	45
3.1.3	La rente viagère différée	45
3.2	Les hypothèses sous-jacentes au modèle	47
3.3	Les Inputs	47
3.4	Cadre de projection	48
3.5	Architecture du modèle	49
3.6	Modules d'agrégation des flux	50
3.7	Les modules produit	50
3.8	Les modules d'export	52
3.9	Recette	52
III	Cas d'usage	55
4	Provisionnement	56
4.1	Calcul de la provision mathématique comptable	56
4.1.1	Méthode Prospective	58
4.1.2	Méthode Rétrospective	59
4.2	La provision mathématique sous la réglementation française	60
4.2.1	Le taux technique	61
4.2.2	Les tables de mortalité	62
4.2.3	Divergences entre les normes	62
4.3	Calcul de la PM au sein du modèle LCF	63
4.3.1	Changement de tables de mortalités	64
4.3.2	Ajustement de la PM et des flux	66
4.3.3	Les intérêts techniques	67
5	Le modèle <i>LCF</i> au sein du modèle ALM	69
5.1	Les modèles ALM	69
5.2	L'ALM en <i>flexing</i>	69
5.3	Modélisation de la participation aux bénéfices	70
5.3.1	Réglementation française sur la PB	71
5.3.2	Application d'un taux d'indexation	71
5.3.3	Méthode de <i>flexing</i>	73
5.4	Les scénarios de chocs	75
5.5	Test de fuite	76
6	Le modèle <i>LCF</i> au sein de la solution IFRS 17	77
6.1	Alimentation de la solution IFRS 17	77

6.2	Le <i>Risk Adjustment</i>	78
6.2.1	Les risques sous IFRS 17	79
6.2.2	Propriétés qualitatives du <i>Risk Adjustment</i>	81
6.2.3	Lien avec S2	81
6.3	Modélisation du <i>Risk Adjustment</i>	82
6.3.1	Méthodes par mesure de risque	82
6.3.2	Méthode des chocs de BE	84
6.3.3	Méthode du coût du capital	86
6.3.4	Conversion des SCR en <i>RA</i>	87
IV	Optimisation de performances	90
7	Répondre à une contrainte de performance : le cadre de distribution	91
7.1	Le parallélisme	91
7.1.1	Architecture	91
7.1.2	Fonctionnement du parallélisme	92
7.1.3	Efficacité théorique	93
7.2	Parallélisme dans la bibliothèque <i>Life Cash Flows</i>	95
7.2.1	L'indépendance des lignes	95
7.2.2	Le cadre de distribution	95
7.2.3	Proportion du modèle LCF parallélisable	96
7.3	Objectif de performances et mesure de performances	98
8	Mensualisation de flux de trésorerie annuels	99
8.1	Interpolation des tables de mortalité	99
8.1.1	Hypothèse linéaire : Distribution uniforme des décès	99
8.1.2	Hypothèse exponentielle : Force de mortalité constante	100
8.1.3	Hypothèse hyperbolique : l'hypothèse de Balducci	101
8.1.4	Choix de l'hypothèse	101
8.2	Approximation des flux de trésorerie mensuels	103
8.2.1	Notations	104
8.2.2	Formule de Woolhouse	104
8.2.3	Obtention du montant de la rente mensuelle	105
8.2.4	Approximation des probabilités mensuelles de décès	106
8.3	Étude des écarts	107
8.3.1	Écarts sur le facteur de rente	107
8.3.2	Écarts sur les probabilités sous-jacentes	109
9	Prudent Harmonized Reduced Set of Scenarios	110
9.1	Contexte	110
9.1.1	Valorisation du passif : du stochastique pour la vie	110
9.1.2	La non linéarité en assurance sur la vie	110

9.1.3	Objectif	111
9.2	Les Générateurs de Scénarios Économiques	112
9.2.1	Définition	112
9.2.2	Construction	112
9.3	Génération d'un ensemble réduit de scénarios	113
9.3.1	Méthode 1 - Choix aléatoire des trajectoires stochastiques . .	113
9.3.2	Méthode 2 – Construction de trajectoires par quantile	114
9.3.3	Méthode 3 - Détermination de scénarios représentatifs	115
9.4	Ajustement des scénarios	117
9.4.1	Correspondance des moments	118
9.4.2	Réaffectation des poids	119
9.5	PHRSS : Application	120
9.5.1	Les scénarios utilisés	121
9.5.2	Méthode 1 - Choix aléatoire des trajectoires stochastiques . .	122
9.5.3	Méthode 2 – Construction de trajectoires par quantile	122
9.5.4	Méthode 3 - Détermination de scénarios représentatifs	123
 Conclusion		127
 Références		129
 Liste des figures		131
 Appendices		132

Résumé

Mots clefs : Modélisation actuarielle, Assurance vie, Multinorme, Produit, Temporaire décès, Rente, Provision mathématique, Modèle ALM, Flexing, Participation aux bénéfices, Ajustement pour risque, Optimisation, Parallélisation, PHRSS, GSE, Options et garanties.

Les modèles actuariels possèdent une complexité qui suit celle des normes, et leur utilisation régulière représente un réel coût opérationnel (infrastructure informatique et temps de calcul) pour les assureurs. Dans ce mémoire, nous réalisons une bibliothèque de projection de flux de trésorerie pour des produits vie internationaux, et dont la particularité est de pouvoir alimenter divers modèles adaptés à des normes différentes. L'objectif est une mise en commun des calculs de flux afin de réduire la complexité et le temps nécessaire à la production des indicateurs pour ces différentes normes.

La bibliothèque concerne l'assurance sur la vie. Nous nous concentrerons sur trois produits de base : la temporaire décès, la rente immédiate et la rente différée, pouvant servir de briques élémentaires à la construction de produits plus complexes. Les normes concernées sont Solvabilité 2 et IFRS 17. La bibliothèque pourra se brancher à une solution IFRS 17 et à un modèle ALM, ainsi qu'à une solution Solvabilité 2 mais ce dernier point ne sera pas détaillé dans ce mémoire.

Des techniques d'optimisation seront appliquées à différents niveaux. Sur le plan modèle et logiciel, nous implémenterons une parallélisation des calculs sur le portefeuille de passif. D'un point de vue mathématique, nous procéderons à une approximation des flux en adaptant la formule de Woolhouse. Par ailleurs, nous déploierons une méthode proposée par l'EIOPA, *Prudent Harmonized Reduced Set of Scenarios*, visant à réduire le nombre de scénarios utilisés dans le calcul stochastique des *Best Estimate*.

Abstract

Keywords : Actuarial modeling, Life insurance, Multi-standard, Product, Term life insurance, Annuity, Mathematical reserve, ALM model, Flexing, Profit sharing, Risk adjustment, Optimization, Parallelization, PHRSS, GSE, TVOG.

Actuarial models match norm complexity, their use incurs real operational cost for insurers. In this thesis, we construct a international cash flow projection model designed to integrate with various models and standards, aiming to reduce complexity and usage time.

The library focuses on life insurance. We will focus on three basic products : term life insurance, immediate annuity, and deferred annuity, which serve as elementary bricks for the construction of more complex products. The relevant standards are Solvency II and IFRS 17. The library will be able to integrate with an IFRS 17 solution and an ALM model, as well as a Solvency II solution, although this last point will not be detailed in this thesis.

Optimization techniques will be applied at different levels. From a model and software perspective, we will implement parallelization of calculations across the liability portfolio. Mathematically, we will proceed with a flux approximation by adapting Woolhouse's formula. Additionally, we will deploy a method proposed by EIOPA, *Prudent Harmonized Reduced Set of Scenarios*, aimed at reducing the number of scenarios used in the stochastic calculation of Best Estimates.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon tuteur initial d'entreprise, Thomas BOURDIN, qui m'a accompagné et soutenu tout au long de la réalisation de ce mémoire, mais également le long de mon stage et de mon alternance. Je remercie également mon manager et second tuteur, Janick JEMINET, qui a toujours été présent lorsque nécessaire, et a pleinement pris le relais pour les derniers mois de mon mémoire.

Leur bienveillance, leur implication et leur pédagogie ont été des atouts majeurs tant dans l'élaboration de ce travail que dans l'enrichissement de mon expérience professionnelle.

Je remercie Alexis BIENVENÛE pour sa présence formelle et la confiance qu'il m'a accordé tout au long de ce parcours, ainsi que mes collègues d'addactis[®] dont le soutien et la convivialité ont contribué à rendre cette expérience positive et enrichissante sur le plan humain.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance envers addactis[®] Software pour m'avoir offert une opportunité unique de développement professionnel. Les expériences et connaissances acquises ici seront, j'en suis sûr, fondamentales pour la suite de mon parcours.

Notes de synthèse

Ce mémoire se propose de suivre le développement d'une bibliothèque de produits d'assurance sur la vie, se concentrant sur des produits de base servant d'outils à la création de produits plus complexes. Cette bibliothèque, appelée *Life Cash Flows*, est à visée internationale et multinorme. Son objectif est de permettre une mise en commun des calculs de flux au sein des entreprises soumises à plusieurs normes, notamment IFRS 17 et Solvabilité 2. Elle a également des objectifs de performance, nécessaire pour répondre aux contraintes de plus en plus lourdes imposées par les régulateurs.

La bibliothèque fonctionne de manière modulaire : elle dispose d'un module principal qui agrège les flux des différents produits, et chaque produit se décompose en plusieurs sous-modules dont chacun calcul des grandeurs spécifiques (probabilités, flux de prime, etc.) comme l'illustre l'image ci-dessous :

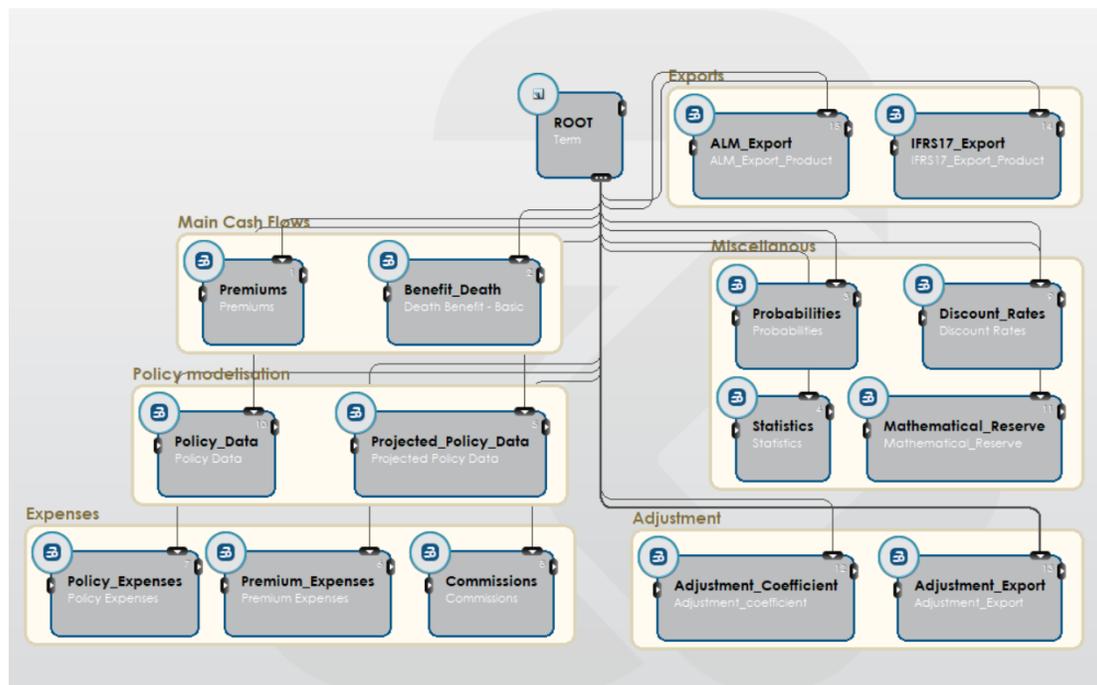


FIGURE 1 – Architecture du module de temporaire décès

L'un des défis de la modélisation multinorme est l'adaptation de la provision mathématique aux réglementations locales, ce que la bibliothèque gère sans mal : le modèle est capable de considérer des différences à la fois réglementaires et méthodologiques. Les différences réglementaires sont gérées à travers une double exécution du modèle : la première détermine une PM selon des hypothèses conformes à la norme locale en vigueur dans le pays de l'entreprise. La seconde projette les

flux selon les hypothèses réelles de l'entreprise. De plus, un coefficient d'ajustement est également calculé lors de la première projection afin de tenir compte des écarts méthodologiques entre la modélisation de la PM du modèle et celle effectuée par le service inventaire.

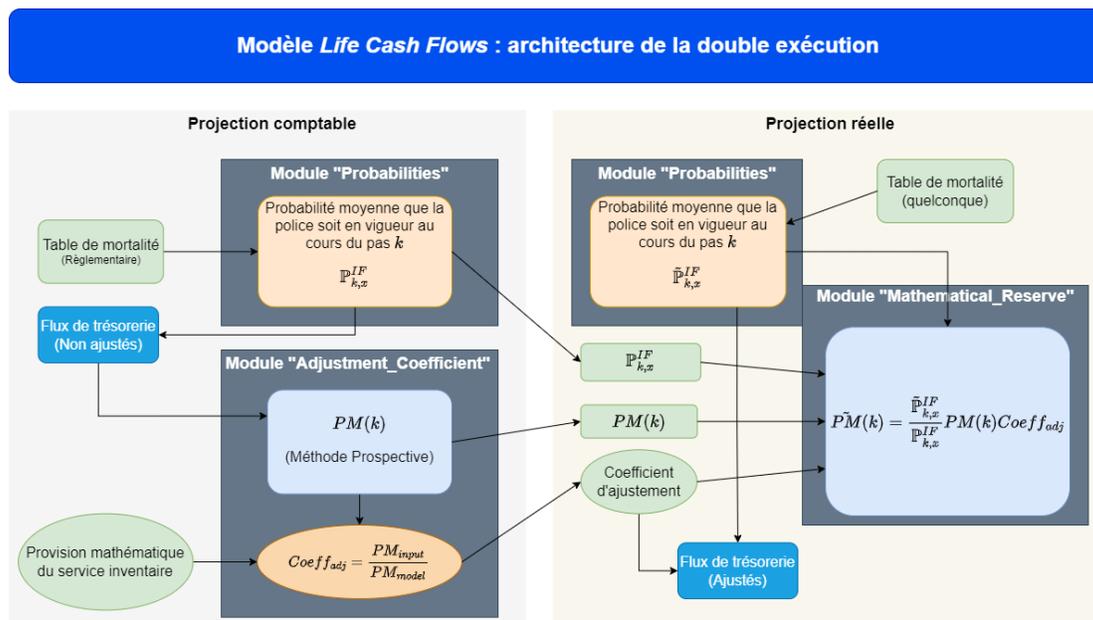


FIGURE 2 – Provision mathématique et Coefficient d'ajustement

La bibliothèque ne modélise que des flux déterministes et sans tenir compte de l'actif. Néanmoins, il est possible d'obtenir une revalorisation tenant compte de l'actif (participation aux bénéficiaires), y compris stochastique, via un modèle ALM qui est directement alimenté par la bibliothèque et qui effectue la revalorisation via une méthode de flexing.

Par ailleurs, que ce soit à la suite du modèle *Life Cash Flows* ou du modèle ALM, les flux sortants alimentent une solution IFRS 17 qui peut entièrement fonctionner à partir des flux fournis et calculer l'ensemble des indicateurs demandés par la norme.

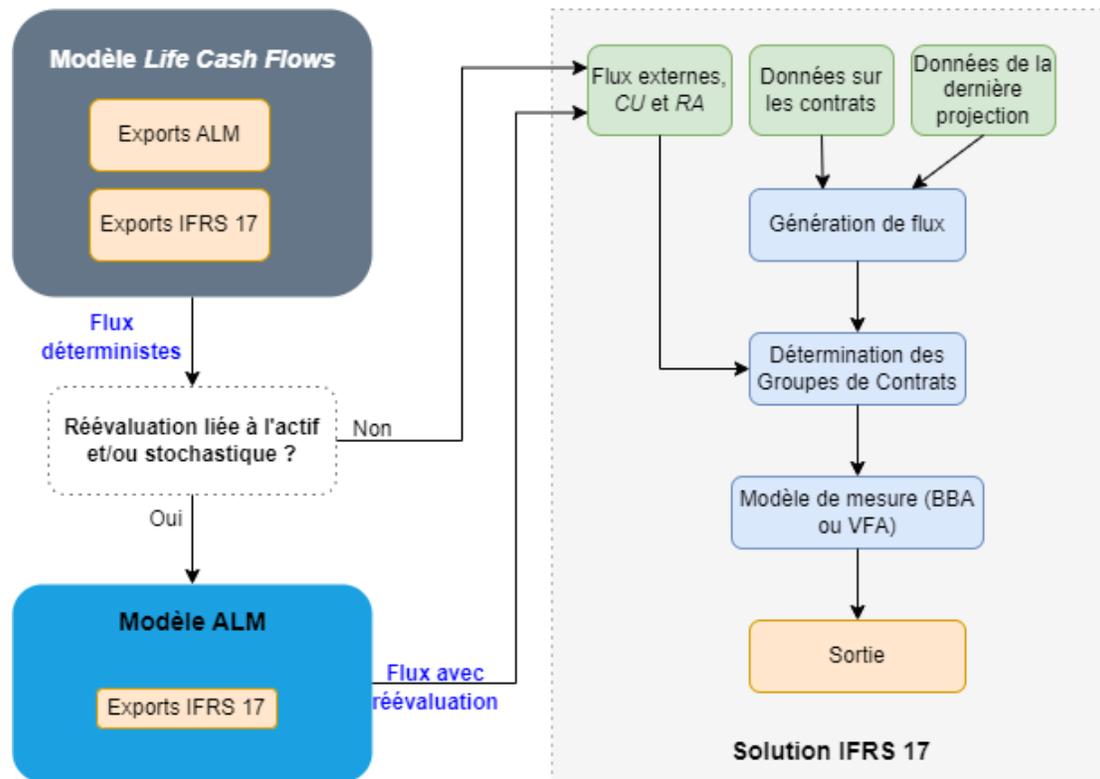


FIGURE 3 – Alimentation de la solution IFRS 17 par la bibliothèque *Life Cash Flows*

Un point important est la modélisation du *Risk Adjustment*, nécessaire afin de calculer la *Present Value*. Pour cela, une méthode retenue est de s’inspirer de Solvabilité 2 pour construire des chocs de *Best Estimate*. Cette méthode a été retenue d’une part car il s’agit d’une méthode éprouvée par S2 et moins coûteuse en calcul que des méthodes calculant la distribution du *RA*, et d’autre part car il existe des méthodes de conversion de SCR solvabilité 2 en *RA* IFRS 17, condensant significativement la production réglementaire pour les entreprises soumises aux deux normes.

La vitesse de calcul est un point essentiel de la bibliothèque *Life Cash Flows*. Pour cela, trois méthodes d’optimisation ont été développées. La première consiste au développement d’un ”cadre de distribution” permettant de paralléliser les calculs le long des lignes des portefeuilles. Cette méthode s’avère hautement efficace puisque la bibliothèque est à 84% parallélisable, offrant une forte réduction de mémoire vive et de temps nécessaires à l’exécution du modèle. La réduction de la mémoire vive est considérable et permet à la fois de ne pas paralyser les ordinateurs durant leur exécution du modèle, et d’utiliser le modèle avec des portefeuilles plus grands sans nécessiter des ordinateurs plus performants. La réduction du temps

de calcul permet de mieux répondre aux délais réglementaires imposés par les normes. Celui-ci s'avère considérable puisqu'il permet une réduction des temps de calcul allant jusqu'à un facteur 3,8 pour un ordinateur à huit processeurs.

Projection	Nombre de polices	Temps d'exécution			Pic de RAM (GO)		
		Objectif	Sans cadre de distribution	Avec cadre de distribution	Objectif	Sans cadre de distribution	Avec cadre de distribution
Mensuelle sur 100 ans	1 000	1min	44s	14s	32	0,5	0,2
	10 000	7min	7min04	1min51	32	4,2	1,1
	100 000	20min	Echec	14min45	32	Echec	6,8

FIGURE 4 – Efficacité du cadre de distribution sur le modèle *Life Cash Flows*

Pour certaines entreprises, la projection des flux à pas mensuel est nécessaire. Cela multipliant les temps de calcul d'un facteur 12, une méthode a été développée pour approximer les flux mensuels à partir de projections à pas annuels. Cette méthode utilise une adaptation de la formule de woolhouse pour adapter les flux, tandis que les probabilités sont également adaptés. L'approximation obtenue n'est précise que sur quelques décennies avant de se dégrader exponentiellement : 3% sur des assurés de 80 ans, 30% sur des assurés de 100 ans. Le graphique ci-dessous mesure l'erreur d'approximation en fonction de l'année de projection et de l'âge de l'assuré au début de la projection (ADP).

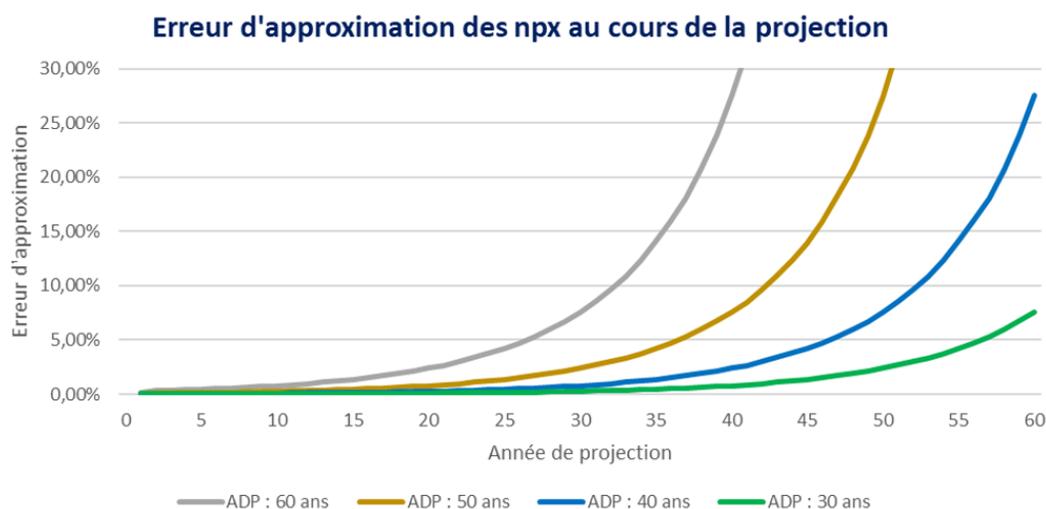


FIGURE 5 – Erreur d'approximation des \overline{np}_x au cours de la projection

Enfin, une méthode récente, *PHRSS* proposée par l'EIOPA, visant à réduire le nombre de scénarios a été étudiée. L'objectif est d'estimer la *TVOG* en utilisant seulement neuf scénarios économiques. Les résultats ne sont pas probants, néanmoins certaines pistes d'améliorations peuvent encore être explorées.

Indicateur (en euros)	2021	2023
<i>BE</i> stochastique	1 349 384 135	1 262 102 832
<i>BE</i> méthode 3	1 343 661 910	1 268 220 152
<i>TVOG</i> stochastique	36 616 284	15 800 668
<i>TVOG</i> méthode 3	30 894 058	21 917 484
Ratio <i>BE</i>	99,58%	100,48%
Ratio <i>TVOG</i>	84,4%	138,7%
Fuite relative (en % de VM)	1,95%	3,1%

TABLE 1 – Approximation de la *TVOG* par la méthode 3

Summary

This thesis aims to follow the development of a life insurance products library, focusing on basic products that serve as tools for creating more complex one. This library, named Life Cash Flows, is intended for international and multi-standard use. Its goal is to facilitate the pooling of cash flow calculations within companies subjected to multiple standards, notably IFRS 17 and Solvency II. It also has performance objectives, necessary to meet the increasingly stringent constraints imposed by regulators.

The library operates in a modular manner : it has a main module that aggregates the flows of different products, and each product is broken down into several sub-modules, each calculating specific quantities (probabilities, premiums, etc.), as illustrated in the image below :

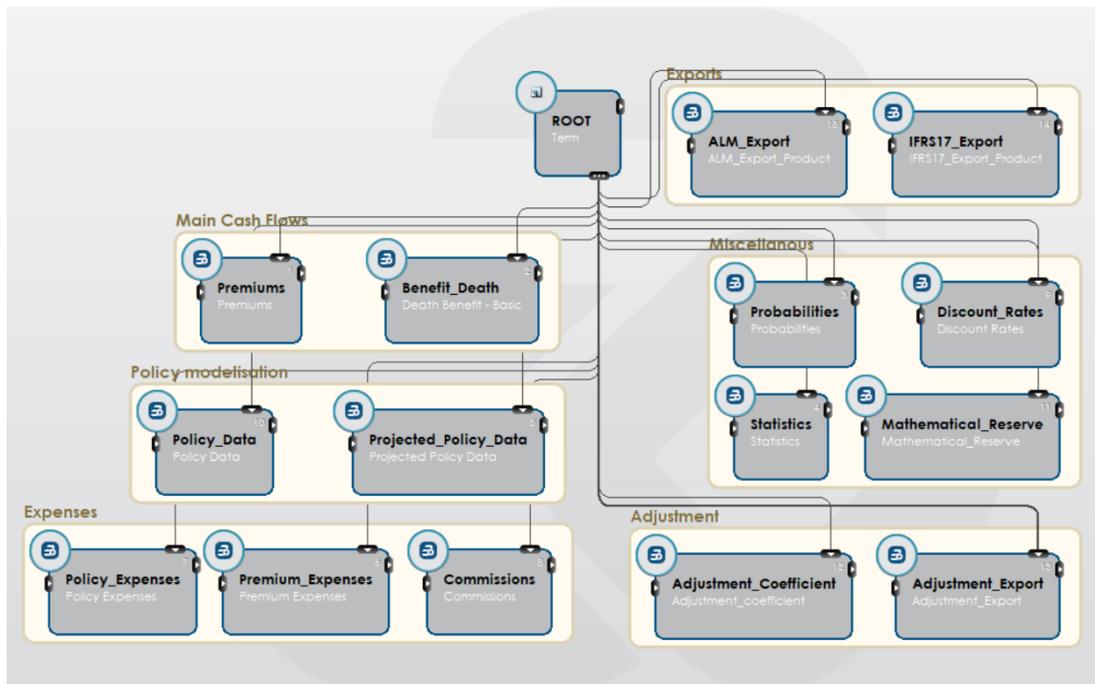


FIGURE 6 – Architecture of the term life module

One of the challenges of multi-standard modeling is adapting the mathematical provision to local regulations, which the library handles effortlessly : the model is capable of considering differences both regulatory and methodological. Regulatory differences are managed through a dual execution of the model : the first determines a mathematical reserve (MR) based on assumptions compliant with the local standard in force in the company's country. The second projects cash flows based on the company's actual assumptions. Furthermore, an adjustment

coefficient is also calculated during the first projection to account for methodological differences between the MR modeling of the model and that performed by the inventory department.

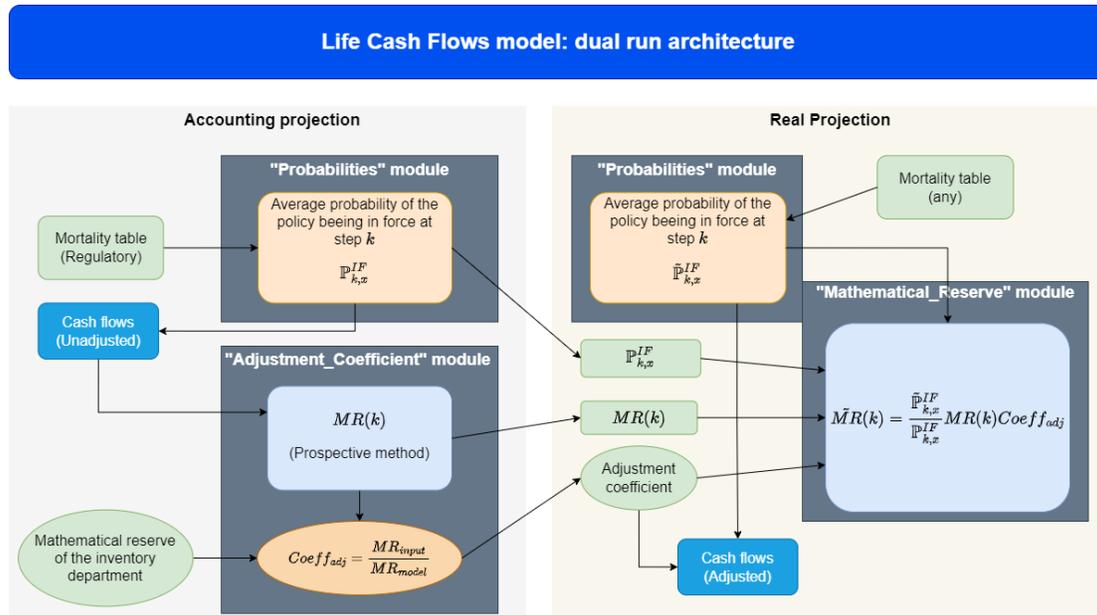


FIGURE 7 – Mathematical reserve and adjustment coefficient

The library only models deterministic flows without considering assets. However, it is possible to obtain a revaluation that takes into account the assets (profit sharing), including stochastic ones, through an ALM model that is directly fed by the library and performs the revaluation using a flexing method.

Moreover, whether following the Life Cash Flows model or the ALM model, the outgoing flows feed into an IFRS 17 solution that can fully operate based on the provided flows and calculate all the indicators required by the standard.

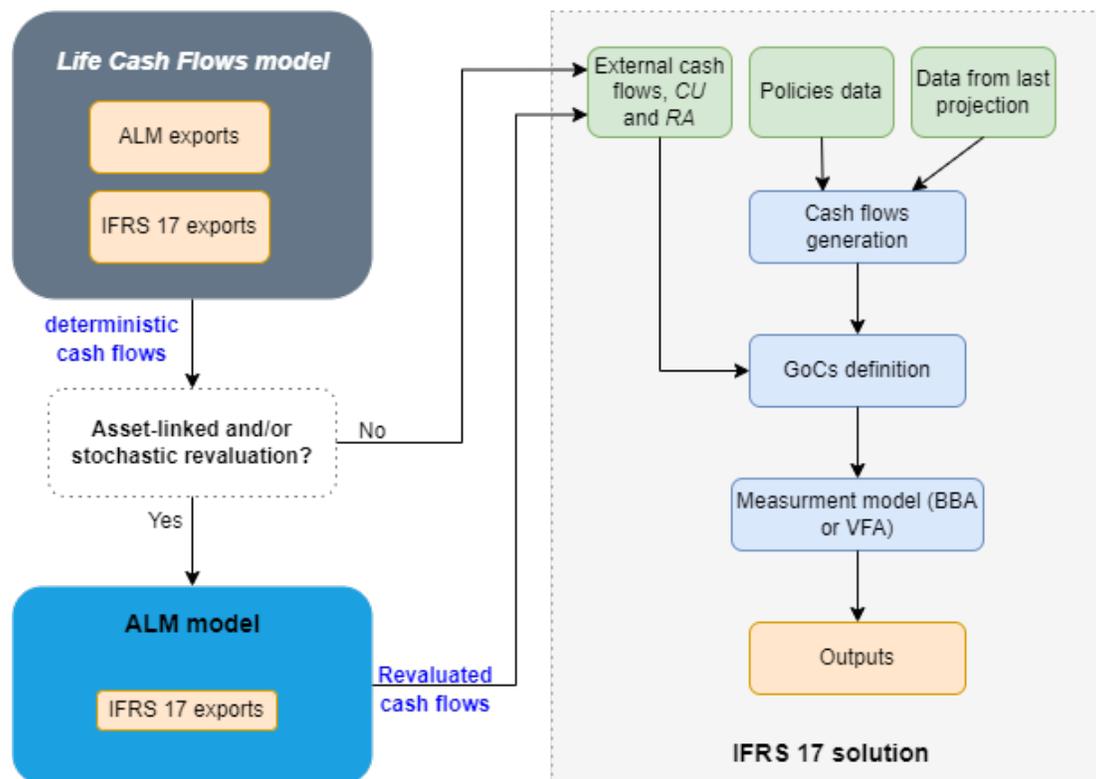


FIGURE 8 – The library *Life Cash Flows* feeds the IFRS 17 solution

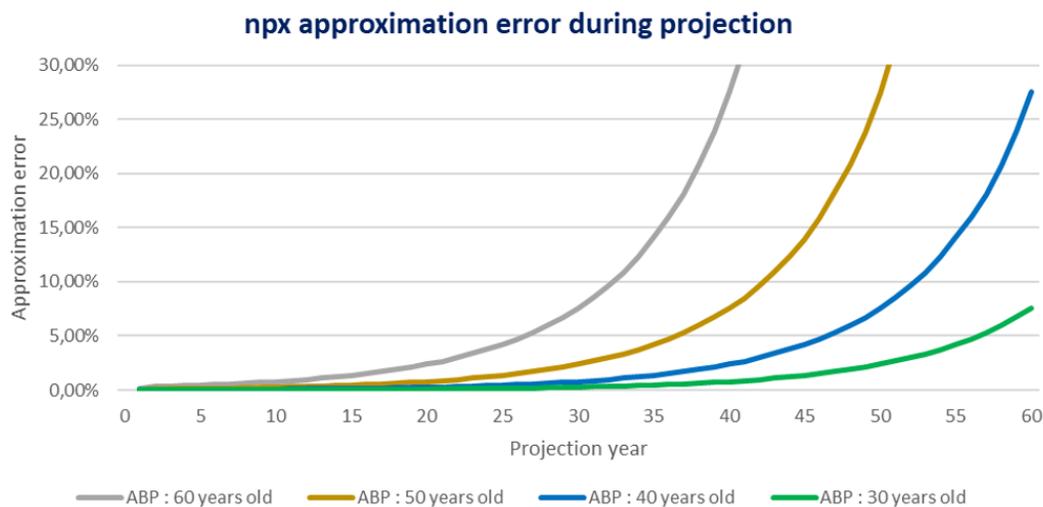
An important aspect is the modeling of the risk adjustment, necessary to calculate the present value. For this, a chosen method is to draw inspiration from Solvency II to construct best estimate stress. This method was selected partly because it is a proven method by S2 and less computationally expensive than methods calculating the distribution of the RA, and partly because there are methods of converting Solvency II SCR into IFRS 17 RA, significantly streamlining regulatory production for companies subject to both standards.

The calculation speed is a crucial point of the Life Cash Flows library. For this, three optimization methods have been developed. The first involves the development of a "distribution scheme" that allows for parallelizing calculations along the lines of portfolios. This method is highly effective since the library is 84% parallelizable, offering a significant reduction in RAM and time needed to execute the model. The reduction in RAM is considerable and allows for the use of the model with larger portfolios without requiring more powerful computers, without paralyzing computers during their execution of the model. The reduction in calculation time helps to better meet the regulatory deadlines imposed by the standards. This proves to be considerable as it allows for a reduction in calculation times by up to a factor of 3.8 for an eight-processor computer.

Projection	Number of policies	Running time			RAM peak (GB)		
		Objective	Without distribution scheme	With distribution scheme	Objective	Without distribution scheme	With distribution scheme
Monthly over 100 years	1 000	1min	44s	14s	32	0,5	0,2
	10 000	7min	7min04	1min51	32	4,2	1,1
	100 000	20min	Failed	14min45	32	Failed	6,8

FIGURE 9 – Distribution scheme efficiency on *Life Cash Flows* model

For some companies, projecting cash flows on a monthly step is necessary. This multiplies the computation time by a factor of 12, so a method has been developed to approximate monthly flows from annual step projections. This method uses an adaptation of the Woolhouse formula to adjust the flows, while the probabilities are also adjusted. The obtained approximation is only accurate for a few decades before it degrades exponentially : 3% for insured individuals of 80 years, 30% for insured individuals of 100 years. The graph below measures the approximation error based on the projection year and the age of the insured at the beginning of the projection (ABP).

FIGURE 10 – $\overline{np_x}$ approximation error during projection

Finally, a recent method, PHRSS proposed by EIOPA, aiming to reduce the number of scenarios, has been studied. The goal is to estimate the TVOG using only nine economic scenarios. The results are not conclusive, however, some potential improvements could still be explored.

Indicator (euros)	2021	2023
Stochastique <i>BE</i>	1 349 384 135	1 262 102 832
methode 3 <i>BE</i>	1 343 661 910	1 268 220 152
Stochastique <i>TVOG</i>	36 616 284	15 800 668
methode 3 <i>TVOG</i>	30 894 058	21 917 484
<i>BE</i> Ratio	99,58%	100,48%
<i>TVOG</i> Ratio	84,4%	138,7%
Relative leak (% of MV)	1,95%	3,1%

TABLE 2 – *TVOG* approximation with methode 3

Introduction

Le monde des compagnies d'assurances est complexe et repose sur la confiance, la stabilité et la protection des parties prenantes. Pour garantir ces éléments cruciaux, l'industrie est soumise à un ensemble de normes et de réglementations qui encadrent ses opérations et ses rapports financiers. Elles imposent des exigences en matière de solvabilité, de gestion des risques, de transparence financière et de protection des consommateurs. Cependant, bien que nécessaires, ces normes ajoutent une charge significative aux processus de reporting des compagnies d'assurances, d'une part en rallongeant le temps nécessaire à leur achèvement, et d'autre part en complexifiant leur réalisation et leur compréhension.

En outre, les délais stricts imposés par les autorités de contrôle accentuent la pression sur les compagnies, accroissant l'importance de posséder des modèles opérationnels hautement réactifs. En effet, les processus de soumissions des rapports aux autorités réglementaires sont longs et laborieux, et les exécutions de modèles se situent parmi les dernières étapes, les rapprochant ainsi des dates limites de rendu. Être capable de maintenir le respect de ces rendus sous contrainte temporelle exige de maîtriser au mieux les temps de calcul des modèles, d'autant plus que ceux-ci peuvent nécessiter plusieurs lancements.

Les modèles de projection de flux de trésorerie sont connus et répandus dans le secteur de l'assurance. Toutefois, face aux défis imposés par l'exigence de rapports fréquents et les délais serrés de soumission, ce mémoire explore le développement d'une bibliothèque de projection de flux de trésorerie spécifique aux produits d'assurance sur la vie. Cette bibliothèque vise à s'intégrer avec d'autres modèles pour améliorer leur efficacité par une mise en commun des calculs. Cette approche se fera dans un cadre international et multinorme, notamment IFRS 17 et Solvabilité II. Elle vise à un gain de simplicité et de compréhension des modèles ainsi qu'à une réduction des temps de leur utilisation.

Nous commencerons par un bref rappel des normes IFRS 17 et Solvabilité 2, une exposition du contexte ayant mené à la réalisation de ce projet et une présentation de la bibliothèque *Life Cash Flows*. Ensuite, nous détaillerons le branchement de la bibliothèque à d'autres modèles ainsi que les développements y afférent. Nous procéderons notamment à une modélisation optimisée du calcul de la provision mathématique et du *Risk Adjustment*. Enfin, nous étudierons des méthodes de réduction du temps d'exécution des modèles. Concernant le modèle *Life Cash Flows*, nous développerons une parallélisation des calculs et une méthode d'approximation des flux mensuels à partir de projections annuelles. Concernant les modèles annexes, nous mettrons en place une technique de réduction du nombre de scénarios pour le calcul stochastique du *Best Estimate*.

I

Contexte

1 Solvabilité 2 et IFRS 17 : Le poids des normes

1.1 Introduction à Solvabilité 2

1.1.1 Les objectifs de S2

Solvabilité 2 repose sur un ensemble de trois piliers interconnectés qui forment le fondement de cette norme réglementaire. Chacun de ces piliers aborde un aspect spécifique de la gestion de la solvabilité, de la gouvernance des risques et de la transparence au sein des compagnies d'assurances.

- **Pilier 1 - Exigences quantitatives** : Le premier pilier de Solvabilité 2 se concentre sur les exigences de capital que les compagnies d'assurances doivent respecter. Celles-ci sont tenues de calculer le capital nécessaire qu'elles doivent posséder compte tenu des risques liés aux différents types de contrats d'assurance qu'elles détiennent, ainsi que des risques opérationnels et de marché.
- **Pilier 2 - Exigences qualitatives** : Le deuxième pilier de Solvabilité 2 met l'accent sur la gestion des risques et la gouvernance interne. Les compagnies d'assurances doivent mettre en place des processus solides pour évaluer, gérer et surveiller leurs risques. La gouvernance joue également un rôle crucial dans ce pilier, en exigeant que les assureurs mettent en place des structures de surveillance efficaces, des comités de gestion des risques et des politiques de contrôle interne. Ces mesures visent à garantir que la gestion des risques est intégrée dans toutes les facettes de l'entreprise.
- **Pilier 3 - Transparence et reporting** : Le troisième pilier de Solvabilité 2 se concentre sur la transparence et la communication des informations. Les compagnies d'assurances sont tenues de fournir des informations détaillées sur leur solvabilité, leur situation financière et leurs pratiques de gestion des risques. Ces informations sont destinées à renforcer la confiance des parties prenantes, y compris les assurés, les investisseurs et les régulateurs. Ce pilier exige que les assureurs publient des rapports réguliers, couvrant divers aspects de leur solvabilité et de leurs risques. Ces rapports aident à évaluer la santé financière des entreprises et à fournir des données utiles pour les décideurs, les investisseurs et les régulateurs.

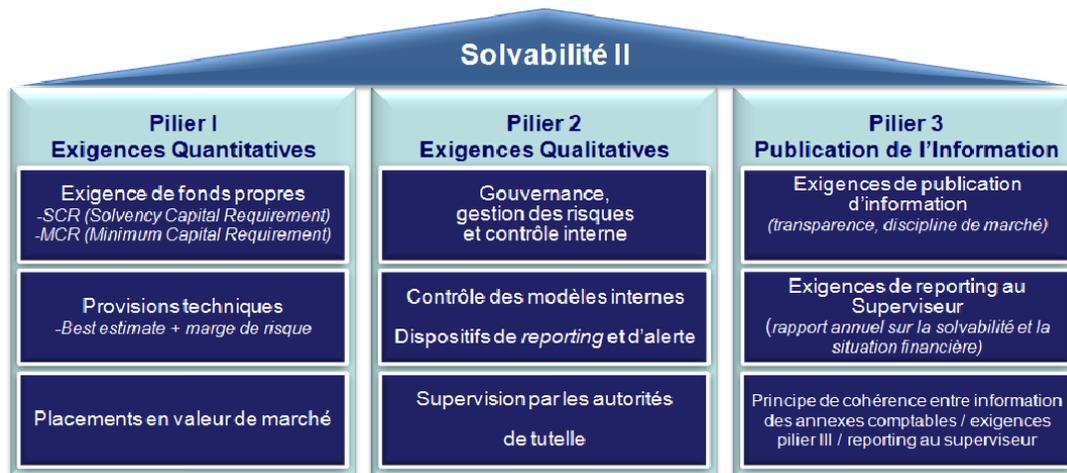


FIGURE 11 – Les trois piliers de Solvabilité 2

En somme, les trois piliers de Solvabilité 2 travaillent en synergie pour créer un cadre complet qui favorise la solvabilité, la gestion des risques et la transparence au sein de l'industrie de l'assurance.

1.1.2 Pilier 1 : Un coût opérationnel élevé

La modélisation du premier pilier repose sur une large quantité d'informations et de calculs.

Les provisions techniques

La valorisation des provisions techniques dans le cadre du pilier 1 passe par le calcul de la meilleure estimation (*Best Estimate, BE*) sommée avec la marge pour risque (*Risk Margin*). La meilleure estimation correspond à l'espérance actualisée des flux de trésorerie futurs. Cela nécessite, outre l'agrégation au sein de l'entreprise d'une vaste quantité de données, de projeter les flux futurs et de les probabiliser. La marge pour risque représente le coût du capital que devrait lever le cessionnaire pour couvrir son exigence de capital jusqu'à l'extinction des passifs. Elle se calcule ainsi :

$$RM = CoC \cdot \sum_{t \geq 0} \frac{SCR_t}{(1 + r_{t+1})^{t+1}}$$

avec :

— *CoC* le coût du capital (fixé à 6% dans S2)

- SCR_t le montant du SCR au pas t
- r_t le taux du pas t

Le capital de solvabilité requis

En formule standard, l'obtention du capital de solvabilité requis (*Solvency Capital Requirement, SCR*) s'obtient par une approche modulaire sur plusieurs niveaux : le SCR global s'obtient via l'agrégation de plusieurs "sous- SCR ", eux même se décomposant en d'autres SCR :

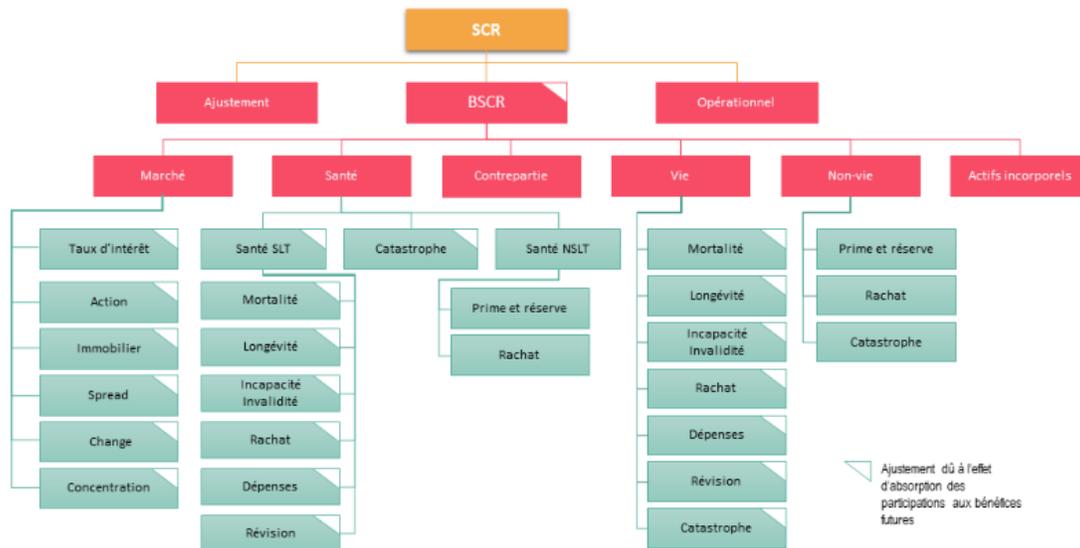


FIGURE 12 – Pieuvre du SCR

Chaque brique élémentaire se détermine via la perte de fond propres causée par la réalisation d'un scénario choqué relativement à un scénario central. Chaque scénario choqué nécessite de recalculer la meilleure estimation et donc les flux futurs concernés. Les scénarios de chocs sont explicitement décrits dans les règlements délégués de Solvabilité 2 et visent à représenter des événements ayant une probabilité de un sur deux cents d'arriver dans l'année.

Les modèles internes

La réglementation Solvabilité 2 autorise les compagnies à utiliser partiellement ou entièrement un modèle interne au lieu de la formule standard. Cependant, le modèle doit pour cela justifier de sa pertinence et être validé par les autorités de contrôle. Les modèles internes reviennent à la définition du SCR en terme de

probabilité :

$$SCR = FP_0 - q_{\frac{1}{200}}(FP_1)DF(0, 1)$$

où :

- FP_t est le montant de fonds propre à l'année t
- $q_{\frac{1}{200}}$ est le quantile d'ordre 99,5% de la distribution de FP_t
- $DF(0, 1)$ est le facteur d'actualisation entre $t = 0$ et $t = 1$

Cette formule requiert l'estimation de la distribution des fonds propres à horizon un an, ce qui peut nécessiter des méthodes stochastiques lourdes en calcul. La méthode la plus courante est celle des simulations dans les simulations (SdS) qui consiste à :

- Générer des simulations de projections de facteurs de risque à horizon 1 an sous probabilité monde réelle afin d'obtenir des simulations de valeur des actifs du bilan économique.
- Effectuer, pour chaque scénario obtenu, de nouvelles simulations risque-neutre afin d'obtenir un montant de fonds propres.

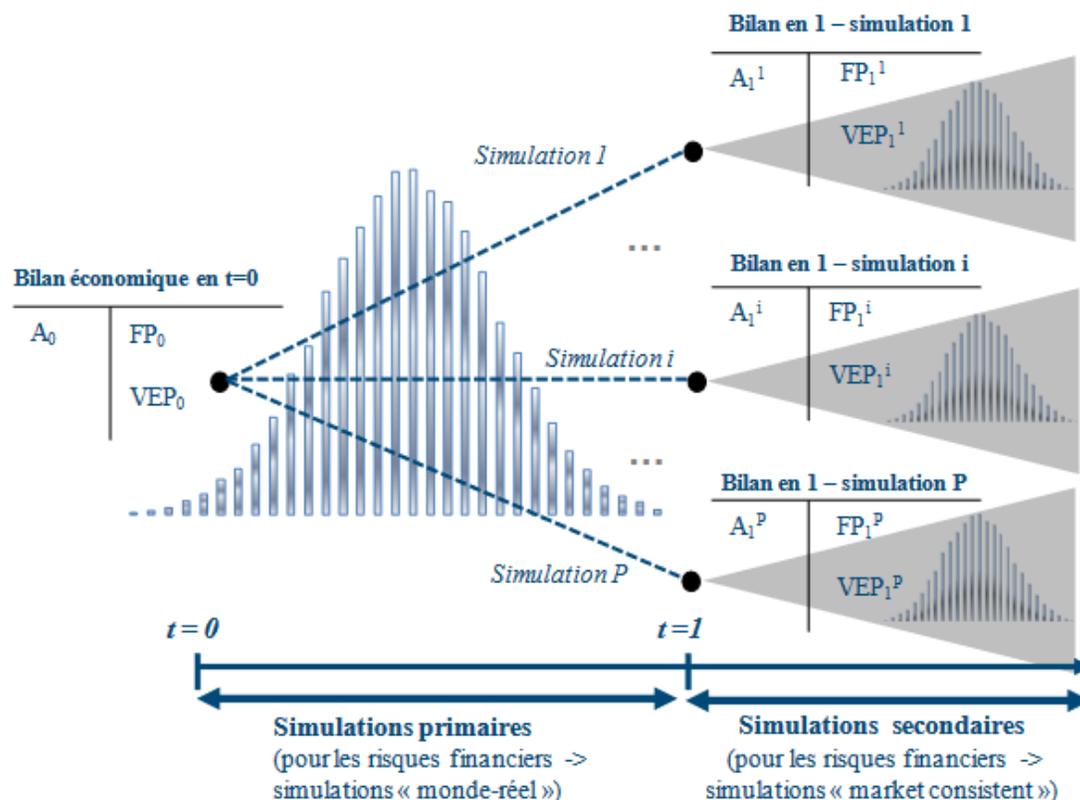


FIGURE 13 – Simulations dans les Simulations

1.1.3 Pilier 2 : Une modélisation plus poussée

Contrairement au pilier 1 qui établit des exigences quantitatives à horizon 1 an, le pilier 2 se concentre sur les aspects qualitatifs de la gestion des risques et à la surveillance prudentielle à moyen et long terme. Il correspond au processus *ORSA* (*Own Risk Assessment Solvency* : évaluation interne des risques et de la solvabilité). Le pilier 2 définit quatre fonctions clefs de la gouvernance au sein de l'entreprise :

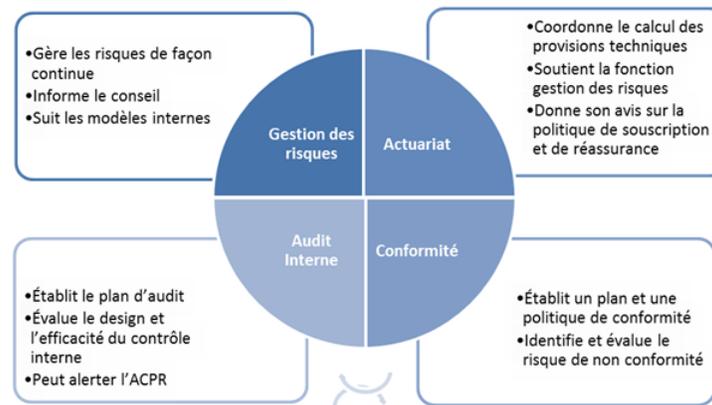


FIGURE 14 – S2 : Fonctions clefs du pilier 2

Une bonne réalisation de l'*ORSA* impose une utilisation conséquente des modèles de calculs. En effet, l'article 45 de la directive S2 stipule :

Dans le cadre de son système de gestion des risques, chaque entreprise d'assurance et de réassurance procède à une évaluation interne des risques et de la solvabilité. Cette évaluation porte au moins sur les éléments suivants :

- Le besoin global de solvabilité, compte tenu du profil de risque spécifique, des limites approuvées de tolérance au risque et de la stratégie commerciale de l'entreprise.
- Le respect permanent des exigences de capital et des provisions techniques.
- La mesure dans laquelle le profil de risque de l'entreprise s'écarte des hypothèses qui sous-tendent le capital de solvabilité requis.

Besoin Global de Solvabilité

Il s'agit d'un calcul prospectif sur les risques auxquels l'entreprise pourrait être exposée en tenant compte de l'évolution future de son profil de risque. Cette évolution peut notamment être dû à l'environnement économique et aux stratégies qu'utilise l'entreprise. Concrètement, l'entreprise doit adapter les calculs du premier pilier selon ses spécificités afin d'optimiser le pilotage de ses risques.

Projection du pilier 1

La composante quantitative de l'*ORSA* nécessite de s'assurer de la conformité au pilier 1 sur toute la durée du plan d'affaire (*business plan*) de l'entreprise. Pour cela, il est nécessaire de projeter le pilier 1 sur plusieurs années mais aussi selon plusieurs scénarios puisqu'il s'agit d'étudier les résultats de scénarios de stress, tout en tenant compte de l'effet des mesures stratégiques prises en réaction à ces scénarios.

1.1.4 Pilier 3 : Les rapports réglementaires

Le pilier 3 est constitué de deux éléments principaux :

- **Les rapports quantitatifs** : Il s'agit de fournir à l'autorité de contrôle nationale un vaste ensemble de données, notamment celles qui ont été préalablement calculées dans le cadre du pilier 1.
- **Les rapports narratifs** : Il s'agit d'expliquer les chiffres transmis dans les rapports quantitatifs.

Les rapports réglementaires couvrent plus que les calculs pour les piliers 1 et 2. Ils englobent généralement diverses activités. Souvent, le département financier fournit les données d'actifs, la comptabilité les états sur le bilan, tandis que l'actuariat gère les rapports sur les provisions techniques et autres. Cette transversalité pose une complexité supplémentaire et incite à une communication efficace entre les services.

Les rapports quantitatifs sont composés en tableaux qui sont organisés en états, également appelés templates ou rapports :

- **Les *QRT* (Quantitative Reporting Templates)** : Ce sont des formats de rapports définis par l'EIOPA qui reprennent les résultats du pilier 1 et

contiennent des informations comptables et financières.

- **Les ENS ou NSR** (Etats Nationaux Spécifiques ou *National Specific Reports*) : Les ENS ont la particularité d'être défini par les autorités nationales et sont donc spécifiques à chaque pays. Cette situation peut accroître la charge associée au reporting dans le cadre de Solvabilité 2 puisqu'elle implique, pour les entreprises ayant des entités à l'international, de réaliser une veille réglementaire dans chaque pays d'implantation.
- **Les états publics** (*disclosure*) : Accessibles à tous, ils sont destinés au marché.
- **Les ajouts de la BCE** (*ECB add-ons*) : Définis par la Banque Central Européenne, ils visent à compléter les *QRT*.
- **Les états de stabilité financière** : Ils ne concernent que les entreprises dont les actifs dépassent les 12 milliards d'euros.
- **Les états pour les sociétés de pays tiers** (*Third Country Branches, TCB*)

Les rapports narratifs sont au nombre de trois :

- **Le RSR** (*Regular Supervisory Report*) : Destiné à l'autorité de supervision, il fournit des détails techniques sur l'activité de l'entreprise, son profil de risque, son système de gouvernance, ainsi son calcul du capital de solvabilité requis.
- **Le SFCR** (*Solvency and Financial Condition Report*) : Destiné au public, il décrit la situation financière, le profil de risque, le système de gouvernance, et les résultats de solvabilité de l'entreprise.
- **Le rapport ORSA** (*Own Risk and Solvency Assessment*) : Il s'agit d'un processus d'auto-évaluation sur les risques spécifiques et la suffisance en capital, principalement pour l'usage interne et l'autorité de supervision, mettant en avant une perspective future sur la solvabilité.

Enfin, il y existe quatre types d'états :

- Les rapports annuels solos.
- Les rapports annuels groupes.
- Les rapports trimestriels solos.

— Les rapports trimestriels groupes.

Concernant les remises trimestrielles, il incombe aux autorités de contrôle de définir des règles qui conditionnent l'obligation de ces remises.

On constate ainsi que, bien que l'introduction de Solvabilité 2 ait amélioré la gestion des risques et la transparence dans l'assurance, elle a aussi introduit une complexité et une charge supplémentaire pour les compagnies. Cette charge est d'autant plus importante que la réglementation subit des révisions régulières afin de rester efficace dans un environnement changeant.

Les rapports de Solvabilité 2 doivent être remis aux autorités de contrôle nationales sous des formats spécifiques et à des dates limites indiquées :

Organismes concernés	Périodicité	Dates de remise à l'ACPR	Collectes
Solo	Trimestrielle*	04/11/2022 04/02/2023 05/05/2023 04/08/2023	Collecte prudentielle trimestrielle - Solo
	Annuelle*	08/04/2023 08/04/2024	Collecte prudentielle annuelle - Solo
	Annuelle	Rapport ORSA : 15 jours au plus tard après validation par le CA/CS	Collecte ORSA
Groupe	Trimestrielle	15/09/2022 16/12/2022 18/03/2023 16/06/2023	Collecte prudentielle trimestrielle - Groupe
	Annuelle	19/05/2023 19/05/2024	Collecte prudentielle annuelle - Groupe
	Annuelle	Rapport ORSA : 15 jours au plus tard après validation par le CA/CS	Collecte ORSA

* Y compris le reporting complémentaire BCE pour les organismes concernés

FIGURE 15 – Dates de reporting S2

1.2 Introduction à IFRS 17

1.2.1 Contexte et Justification

Les investissements, les échanges commerciaux et les expansions d'entreprises se font largement à échelle mondiale, impliquant divers acteurs du secteur de l'entreprise et de la finance. Dans ce contexte, les normes comptables jouent un rôle crucial. Cependant, la variabilité des normes entre les pays complique et complexifie la comparaison entre les compagnies, entraînant ainsi des charges pour les entreprises et des risques pour les investisseurs.

L'*IASB* (*International Accounting Standards Board*) est un organisme indépendant chargé de développer des normes et des directives comptables internationales dans le but de faciliter la comparabilité des états financiers et la prise de décision éclairée des investisseurs. Elle crée notamment les normes IFRS (*International Financial Reporting Standards*) et en particulier la norme IFRS 17 dont l'objectif est triple :

- Fournir des informations plus précises sur les engagements financiers et les risques associés aux contrats d'assurance. Ceci permet une meilleure évaluation des entreprises.
- Simplifier et harmoniser les pratiques comptables. Ceci facilite la comparabilité des entreprises d'assurances sur les différents marchés, notamment à l'international.
- Répondre aux lacunes des normes précédentes (IFRS 4) afin de permettre une meilleure gestion des risques, par exemple en isolant mieux le résultat de l'activité d'assurance de celui des autres activités.

1. Les contrats sont d'abord organisés en cohortes annuelles : deux contrats d'une même cohorte doivent toujours avoir été émis à moins d'un an d'intervalle.
2. Au sein de chaque cohorte les contrats sont agrégés en trois groupes selon la valeur du flux de trésorerie d'exécution (*Fulfilment Cash Flow, FCF*) à la comptabilisation initiale. Le *FCF* est la somme du *Current Estimate* et du *Risk Adjustment*, c'est à dire l'estimation de la valeur des flux futurs avec prise en compte du risque non financier. Les groupes sont :
 - Les contrats onéreux : ce sont ceux dont le *FCF* est strictement négatif.
 - Les contrats profitables ayant un risque significatif de devenir onéreux : il s'agit des contrats dont le *FCF* est positif mais inférieur à un seuil.
 - Les contrats profitables n'ayant pas de risque significatif de devenir onéreux : c'est à dire ceux dont le *FCF* est supérieur à ce seuil.

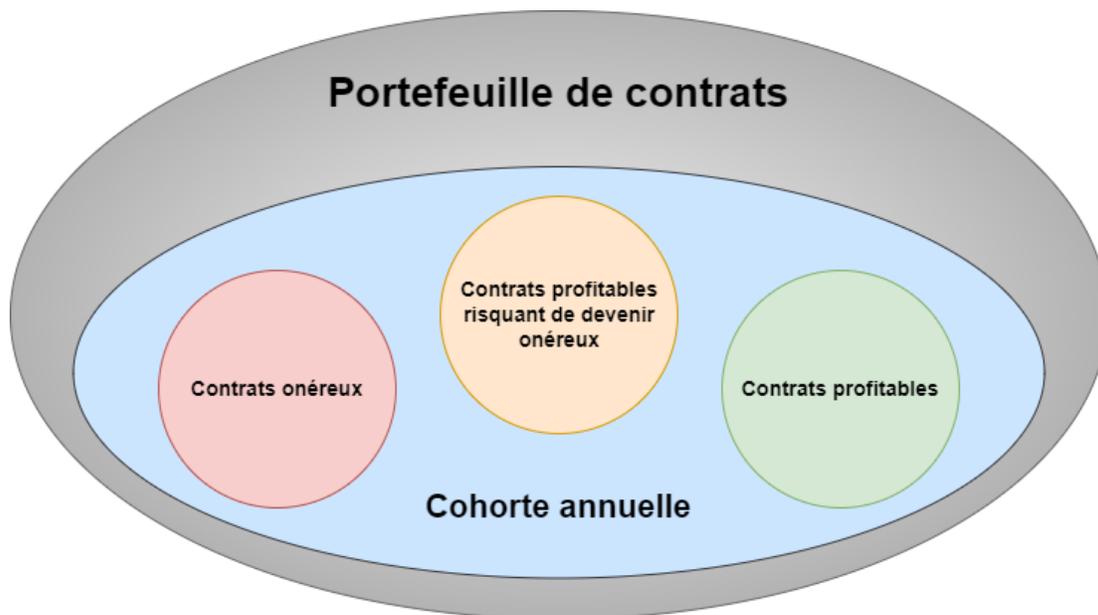


FIGURE 17 – Agrégation de contrats sous IFRS 17

Une fois formés, les groupes sont définitifs et ne peuvent plus être modifiés. Les différentes mesures et déclaration réglementaires se font généralement à la maille du groupe.

La valorisation

La valorisation s'obtient comme la somme des trois éléments du passif qui sont :

- **L'estimation à jour** (*Current Estimate*) : il s'agit de l'espérance actualisée des flux de trésorerie futurs dans le périmètre du contrat. Cette notion se rapproche de celle du *Best Estimate* de Solvabilité 2.
- **L'ajustement au titre du risque non financier** (*Risk Adjustment, RA*) : Il s'agit d'une prime de risque couvrant l'incertitude sur la réalisation et le montants des flux de trésorerie futurs contingents aux risques non-financiers.
- **La marge de service contractuelle** (*Contractual Service Margin, CSM*) : Il s'agit du profit attendu au cours du contrat. Elle se comptabilise progressivement dans le compte de résultat.

1.2.3 Le coût opérationnel de la modélisation

Afin de se conformer aux normes, la modélisation à effectuer est complexe et différentes méthodes de valorisation du passif sont applicables.

Le *Current Estimate*

Sa modélisation nécessite l'obtention de nombreuses informations : le *Current Estimate* doit être cohérent avec les prix du marché, faire usage de toutes les informations disponibles et tenir compte des hypothèses utilisées. Les projections doivent en particulier tenir compte des engagements, des primes, des frais, des taxes, des rachats, ou tout autre flux dans le périmètre du contrat.

A cause de la complexité de modélisation de certaines notions telles que la revalorisation ou certaines options d'engagement, il est parfois nécessaires de recourir à des simulations de type Monte-Carlo ce qui alourdit fortement les calculs à effectuer.

De plus, le *Current Estimate* doit être réévalué en fonction de différentes modifications telles que les variations de prestations ou les changement d'hypothèses. Il doit également tenir compte de l'actualisation.

L'ajustement au titre du risque non financier

La méthode d'estimation du *Risk Adjustment* est laissée libre sous contrainte d'être pertinente. L'une des méthodes usuelle est celle du coût du capital, vu précédemment et utilisée dans Solvabilité 2. Cette méthode requiert de calculer un *SCR*, donc de refaire des calculs du domaine du pilier 1 de S2, ce qui rend intéressant la recherche d'une mise en commun des calculs. La modélisation du *Risk Adjustment* est développée dans la section 6 de ce mémoire.

La marge de service contractuelle

Une fois les deux éléments précédent calculés, il faut à la fois déterminer la *CSM* et son allocation. Il existe également différentes manières de les modéliser mais cela engendre toujours un certains coût en terme de complexité et de calcul.

1.2.4 Les états financiers

Contrairement à Solvabilité 2, IFRS 17 n'impose pas une remise strictement organisée sous des formats et modalités spécifiques à des autorités de contrôles. La preuve du respect de la norme transparait à travers les états financiers de l'entreprise qui sont consultables pour audit. Ceux-ci sont les suivants [5] :

- Le bilan
- Le compte de résultat
- Les *other comprehensive income* (ou "autres éléments du résultats global")
- Le résultat des activités d'assurance
- Le résultat financier
- La composante d'investissement
- Les *disclosure* (ou "obligations d'information")

Le bilan

Le bilan offre un aperçu de la situation financière d'une entreprise à un moment donné. Il se décompose en deux parties : l'actif et le passif, qui respectent l'équation fondamentale : Actif = Passif. L'actif comprend les biens et les droits de l'entreprise, tels que les liquidités, investissements, créances et immobilisations, tandis que le passif regroupe les obligations financières et les capitaux propres. Alors que le bilan classique est en valeur comptable, le bilan IFRS se veut en valeur économique. Ainsi, la valorisation des passifs se fait à travers les concepts des parties précédentes.

Le compte de résultat

Le compte de résultat (*Profit and Loss statement, P&L*) résume la performance financière d'une entreprise sur une période donnée. Il présente les revenus et les coûts générés par l'entreprise via la production et la vente de biens et de services. Le résultat final est le bénéfice net ou la perte nette de l'entreprise après avoir pris en compte l'ensemble des charges et produits. Le compte de résultat permet de comprendre la rentabilité de l'entreprise, sa capacité à générer des bénéfices et à gérer ses dépenses.

La norme IFRS 17 impose de ventiler le compte de résultat entre l'activité assurantielle et non assurantielle. Les éléments à modéliser dans la partie précédente s'y retrouvent indirectement puisque les charges et produits doivent figurer à la maille du groupe de contrat.

Les Comprehensive Income

Il s'agit d'un état venant compléter le compte de résultat. ce sont des équivalente des "autres fonds propres" de solvabilité 2.

Le résultat du service d'assurance

Il s'agit de la différence entre les revenus générés par l'activité assurantielle et les dépenses liées.

Le résultat financier

Il s'agit du résultat lié aux investissements de l'assureur.

La composante d'investissement

IFRS17 exige de séparer les flux de trésorerie liés à l'investissement des primes de ceux directement associés à la couverture du risque. Ceci permet de reconnaître la performance d'investissement séparément de celle d'assurance, offrant une vue plus claire sur la contribution des activités d'investissement aux résultats de l'entreprise.

Pour cela, la composante d'investissement représente le montant que l'entité s'engage à verser au preneur d'assurance indépendamment de toute circonstance (survenance ou non d'un sinistre). Par exemple, elle peut correspondre :

- **Pour une assurance vie** : Le montant d'épargne avec participation au bénéfice.
- **Pour une assurance mixte** : Le capital versé en cas de décès avant le terme ou en cas de vie au terme.

- **Pour une rente viagère** : Au montant de rente garantie.

Les obligations d'information (*disclosure*)

Un des objectifs d'IFRS17 est de communiquer des informations financières pour évaluer les entreprises. Les obligations d'information visent à garantir que les entités détaillent dans leurs notes des informations qui, en complément de celles des principaux états financiers, aident les utilisateurs à comprendre comment les contrats relevant d'IFRS 17 affectent leur position financière, leur performance et leurs flux de trésorerie. Pour cela, les entités doivent inclure des données qualitatives et quantitatives spécifiques, listé dans le paragraphe 93 de la norme :

- Les montants comptabilisés dans ses états financiers relativement aux contrats qui entrent dans le champ d'application d'IFRS 17 (voir paragraphes 97 à 116).
- Les jugements importants, et leurs modifications, faits lors de l'application d'IFRS 17 (voir paragraphes 117 à 120).
- La nature et l'importance des risques afférents aux contrats qui entrent dans le champ d'application d'IFRS 17 (voir paragraphes 121 à 132).

1.3 Processus de reporting : un temps difficilement compressible

Bien que les normes soient en partie présentes pour protéger et renforcer les compagnies d'assurances, les assureurs se trouvent souvent pris entre les délais nécessaires pour préparer des rapports précis et détaillés, et les échéances strictes imposées par les autorités de contrôle.

1.3.1 Les étapes du processus

Les assureurs doivent d'une part consacrer du temps et des ressources considérables à la collecte, à l'agrégation et à l'analyse des données nécessaires pour préparer les rapports réglementaires, et d'autre part se conformer à des dates limites strictes pour soumettre leurs rapports. Cette tension entre délais nécessaires et imposés est une charge périodique, rendant pertinente l'optimisation des processus de reportings.

1. **Collecte et agrégation de données** : Le processus commence par la collecte exhaustive de données provenant de diverses sources au sein de l'entreprise. Cela comprend des informations sur les contrats d'assurance en cours, les provisions techniques, les risques, les sinistres, les investissements et tout facteurs pertinents pour la détermination des données nécessaires au reporting.
2. **Évaluation des risques** : Une fois les données collectées, les compagnies doivent évaluer les risques associés à leurs opérations. Cela implique l'utilisation de modèles de calcul et de méthodologies complexes.
3. **Préparation des états financiers et rapports réglementaires** : Les entreprises doivent ensuite préparer les rapports réglementaires conformément aux directives de Solvabilité 2. Ces rapports détaillés incluent des informations sur les réserves techniques, les exigences de capital, les risques identifiés, les politiques de gouvernance des risques et d'autres aspects spécifiques exigés par la réglementation. Il doivent faire de même pour les états financiers exigés par IFRS 17, augmentant considérablement la quantité d'information à récupérer et préparer pour les entreprises soumises aux deux normes.
4. **Revue et vérification** : Avant publication ou soumission aux autorités de contrôle, les entreprises doivent procéder à une revue interne approfondie pour vérifier l'exactitude et la cohérence des informations fournies. Cela implique souvent des processus de validation et de vérification menés par des équipes spécialisées.
5. **Soumission aux autorités de contrôle** : Concernant Solvabilité 2, une fois que les rapports ont été préparés et vérifiés, les entreprises d'assurances les soumettent aux autorités de contrôle compétentes conformément aux échéances prescrites. Cela peut impliquer l'utilisation de plates-formes de soumission électronique et le respect de processus de conformité spécifiques.

L'ensemble de ces étapes exige une coordination minutieuse entre les différents départements au sein des entreprises d'assurances, tels que les services financiers, les actuaires, les gestionnaires des risques et les équipes de conformité. Les assureurs doivent s'assurer que les données sont précises, que les évaluations des risques sont fiables et que les rapports sont conformes aux normes réglementaires en vigueur.

1.3.2 Le poids des reportings

L'adoption d'IFRS 17 et de Solvabilité II par les entreprises d'assurances a marqué des avancées significatives en matière de transparence, de conformité et de gestion des risques dans le secteur. Cependant, ces améliorations ont également engendré des défis notables pour les assureurs, notamment en ce qui concerne les charges opérationnelles, la complexité des processus de reporting, et la communication avec les autorités de contrôle. Ces adaptations ont imposé des coûts significatifs et demandé des efforts considérables pour se conformer aux exigences accrues en matière de reporting et de gestion des risques.

La complexité des méthodes de comptabilisation et d'évaluation prudentielle a mis en avant la nécessité pour les entreprises d'assurances de collecter, agréger et analyser des quantités massives de données pour préparer leurs rapports réglementaires. Les contraintes de temps ajoutent une pression supplémentaire aux assureurs : les échéances strictes imposées par les autorités de contrôle nécessitent une préparation minutieuse et une exécution rapide du reporting. La réalisation de chaque étape de reporting au moment opportun devient un impératif, mettant ainsi à l'épreuve les ressources humaines et technologiques des entreprises d'assurances.

Dans ce contexte, il est devenu crucial de posséder des modèles efficaces et performants car des modèles trop complexes à manipuler ou avec durées de calcul trop élevées peuvent causer ou accentuer un retard dans une période où le temps est précieux. Or, d'une part les retards génèrent des risques en terme de sanction par les autorités de contrôle et en terme d'image de l'entreprise sur les marchés ; d'autre part la pression créée par un manque de temps peut suffire à dégrader la qualité de travail des employés, ou bien rendre nécessaire une augmentation du personnel pour faire face à la charge de travail.

1.3.3 Le multinorme accroît la complexité

Les informations exigées par Solvabilité 2 et IFRS 17 sont le résultat de nombreux calculs. Certains de ces calculs peuvent être mis en commun mais cette tâche est rendu difficile par les nombreuses divergences de fonctionnement de ces deux normes. En effet, certaines notions sont difficiles à concilier comme la maille des calcul : là où Solvabilité 2 procède par groupe de risques homogènes, IFRS 17 raisonne en terme d'année d'émission et de rentabilité. Néanmoins, d'autres notions ont une meilleure compatibilité, comme l'approche des provisions techniques par *Best Estimate* qui, commune aux deux normes, rend mutualisable la

modélisation des flux de trésorerie, ce que vise à faire le modèle développé dans le cadre de ce mémoire.

	Solvency 2	IFRS 17
Scope	European	International
Approach	Prescriptive	Principle based
Group of contracts	Separating by homogenous risk groups (HRC)	Grouping by year of issue and profitability (separation between onerous and non onerous contracts)
Profit	Recognized immediately in own funds	Amortization during the group of contracts life (No initial gain or loss recognition)
Risk Margin	Cost of capital 6%	Method has to be chosen by the company
Technical provisions calculation	Best estimate approach	

FIGURE 18 – S2 et IFRS 17 : Des fonctionnements différents.

Les entreprises soumises aux deux normes ont intérêt à capitaliser sur leurs similitudes afin de réduire au mieux l'ajout de complexité de calculs posé par le respect simultané des deux normes.

2 Contexte d'entreprise

Avant d'entrer dans les détails de cette étude, il est utile de fournir un aperçu de l'entreprise qui en constitue le point focal. Cela permettra de mieux saisir la toile de fond dans laquelle évoluent les thématiques abordées.

2.1 addactis Group : une entreprise internationale

addactis Group est une entreprise de conseil en actuariat et de développement de logiciels et modèles actuariels. Elle se divise en plusieurs entités :

- **addactis Worldwide** : Coordonne l'activité à l'échelle internationale et gère la distribution et l'implémentation des logiciels dans le monde.
- **addactis Management** : Concentre les services de support
- **addactis France** : Effectue le conseil en actuariat
- **addactis Software** : Développe les logiciels et modèles actuariels

Aujourd'hui, les logiciels et modèles d'addactis sont présents dans une cinquantaine de pays et l'entreprise réunit plus de 250 collaborateurs répartis dans une vingtaine d'entre eux. De par son rôle international, addactis commercialise des modèles s'adaptant à de nombreux besoins afin de cibler une quantité variée d'acteurs. Ainsi, la conception de modèles multinormes représente une opportunité de maintien de son développement.



FIGURE 19 – Pays dans lesquels addactis est implantée

2.2 addactis Software : Développement de modèles pour l'international

addactis Software développe de nombreux logiciels pour répondre à l'ensemble des besoins des compagnies d'assurances et de réassurances mondiales : tarification, provisionnement, modélisation, analyse et reporting.

Le logiciel sur lequel sera basé le projet de la bibliothèque *Life Cash Flows* est *addactis[®] Modeling* qui permet de développer tout type de modèles actuariels avec des contraintes de sécurité, traçabilité et piste d'audit conformes aux normes réglementaires.

2.3 Méthodologie de gestion de projet

Ce mémoire s'articule autour de la réalisation du projet de construction de la bibliothèque *Life Cash Flows*. Afin de fonctionner, le projet doit répondre à des besoins qu'il est crucial de bien cerner. Ainsi, la première étape consiste à recueillir les besoins des différentes équipes de l'entreprise puis de définir explicitement les choix de développement qui seront fait au sein d'une note de cadrage. Pour ce faire, il a été nécessaire d'entrer en contact avec les différentes équipes d'addactis qui sont en contact direct avec les clients afin de comprendre sur quelles spécificités il est le plus pertinent de se concentrer.

Les produits modélisés

Dans un objectif commercial, il est important de bien choisir les produits modélisés. En effet, ceux-ci doivent pouvoir s'adapter à une vaste gamme de produits pour intéresser un maximum de clients potentiels. Ainsi le choix s'est porté sur la construction de trois produits de base qui serviront d'outils à la création de produits assurantiels plus complexes. Ces produits de base sont :

- L'assurance décès temporaire (*Term*)
- La rente immédiate (*Immediate Annuity*)
- La rente différée (*Deferred Annuity*)

La bibliothèque modélisera les provisions liées à chaque produit et calculera un coefficient d'ajustement pour tenir compte d'écarts méthodologiques entre les provisions modélisées et celles entrées en input.

Enfin, la modélisation de la participation aux bénéfices a un impact majeur

sur la complexité du modèle. Celle-ci pourra se modéliser de deux manières : via un simple taux de revalorisation en input ou via le branchement du modèle à un modèle ALM qui utilisera un algorithme spécifique pour tenir compte de l'interaction actif-passif.

Utilisations

La bibliothèque *Life Cash Flows* ayant une visée à l'internationale, son développement sera fait en anglais. Elle pourra se brancher à un modèle ALM, à une solution IFRS 17, ainsi qu'à une solution S2 pilier 1, mais ce dernier point ne sera pas détaillé dans ce mémoire. La mise en compatibilité avec les autres solutions est développée dans les parties 4 à 6 de ce mémoire.

Performances et volumétries

Le noyau du projet est d'obtenir une bibliothèque efficace de modélisation de produits. Il est donc indispensable de veiller à ce que celle-ci reste performante en terme de temps de calcul pour le périmètre sur lequel elle est utilisée. Par exemple, la bibliothèque doit être en mesure d'effectuer une projection à pas mensuel sur un horizon de cent ans, et ce avec un portefeuille de cent mille polices en un temps de moins de 20 minutes. L'éloignement de l'horizon de projection et la finesse des pas complique le respect de la contrainte de temps. Les méthodes d'optimisation du modèle font l'objet des parties 7 à 9 de ce mémoire.

Documentation et reporting

Concernant le Reporting, le modèle générera un bilan S2, un *BE* détaillé, et un reporting IFRS 17. Il intégrera également une documentation détaillée afin d'optimiser sur le long terme son utilisation par les équipes.

II

La bibliothèque *Life Cash Flows*

3 Présentation de la bibliothèque *LCF*

3.1 Les produits modélisés

Les produits d'assurance sur la vie sont nombreux. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrerons sur trois produits de base, servant de briques élémentaires à l'élaboration de produits plus complexes. Ces produits de base ont été choisis pour leur potentiel étendu d'utilisation à l'international. Il s'agit de :

- L'assurance décès temporaire.
- La rente viagère immédiate.
- La rente viagère différée avec constitution d'une épargne.

3.1.1 L'assurance décès temporaire

L'assurance décès temporaire est conçue pour offrir une protection financière en cas de décès prématuré de l'assuré. L'intérêt de ce produit réside dans son caractère temporaire qui implique une prime plus basse et donc une accessibilité accrue.

Il consiste en une garantie décès pendant une durée déterminée. Si l'assuré décède pendant cette garantie, un paiement est effectué par l'assureur envers des bénéficiaires désignés. Le montant du capital décès est défini au début de la police. Il est possible d'augmenter le capital assuré en utilisant un taux d'indexation des prestations défini en entrée, et de même pour les primes. Les temporaires décès n'ont pas d'autre valeur que le capital décès garanti : il n'y a pas de volet d'épargne, ce qui signifie, entre autre, qu'il n'est pas possible d'effectuer des rachats partiels ou totaux.

Diagramme de flux : Temporaire décès

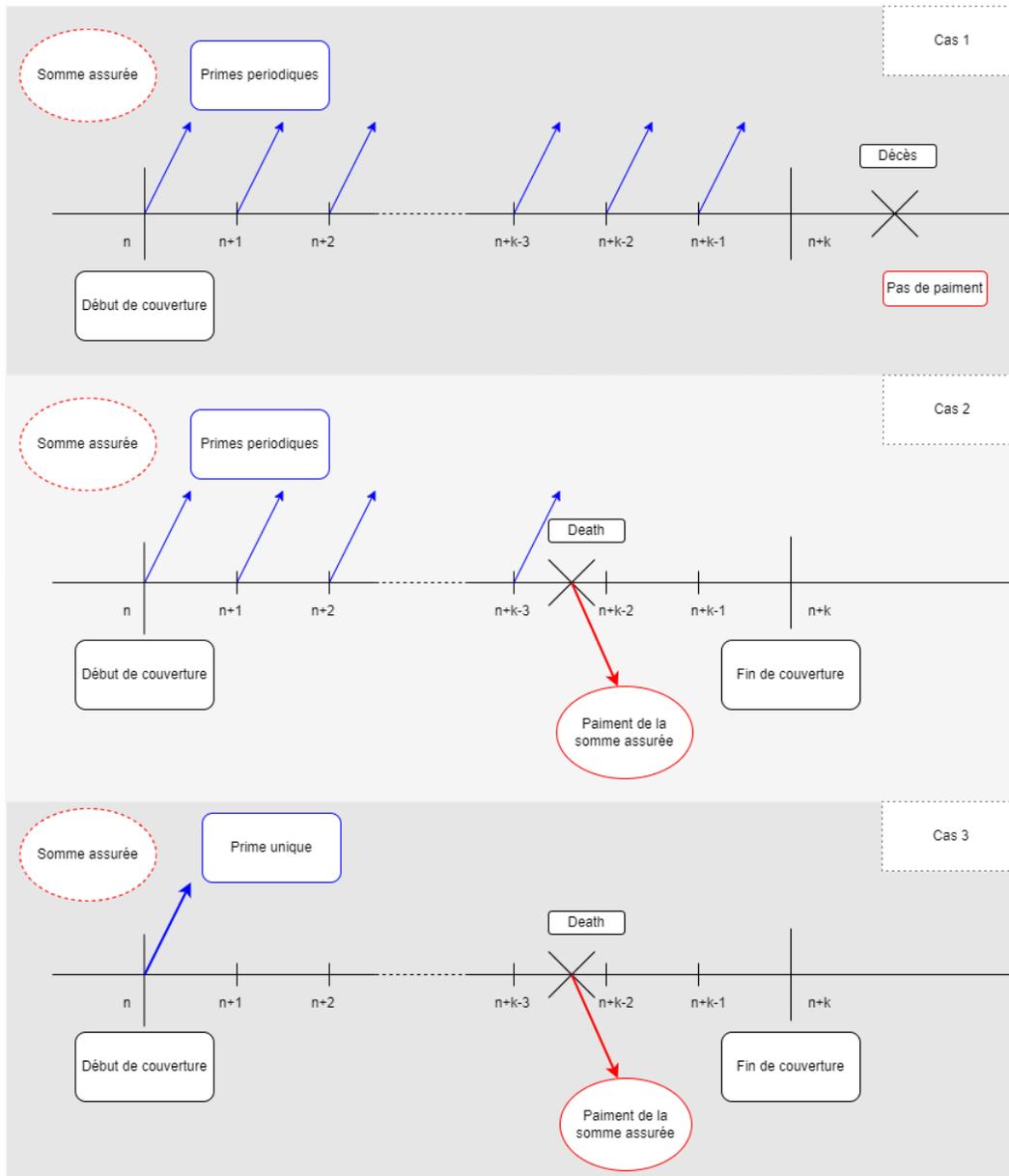


FIGURE 20 – Diagramme de flux : l'assurance décès temporaire

Ce capital peut être utilisé pour couvrir des dépenses liées aux funérailles, rembourser des dettes, maintenir le niveau de vie de la famille ou répondre à d'autres besoins financiers immédiats.

3.1.2 La rente viagère Immédiate

Le mécanisme de la rente viagère immédiate implique le paiement d'une somme forfaitaire, appelée "prime unique", en échange de revenus réguliers tant que l'assuré est en vie. Le montant initial de rente est définie dans le contrat. La prime unique est versée dès le début de contrat et marque le début de la rente. Il est possible d'augmenter la rente en utilisant un taux d'indexation défini en entrée. Les polices de rentes n'ont pas d'autre valeur que le flux de paiements des rentes et ne comportent pas de volet d'épargne.

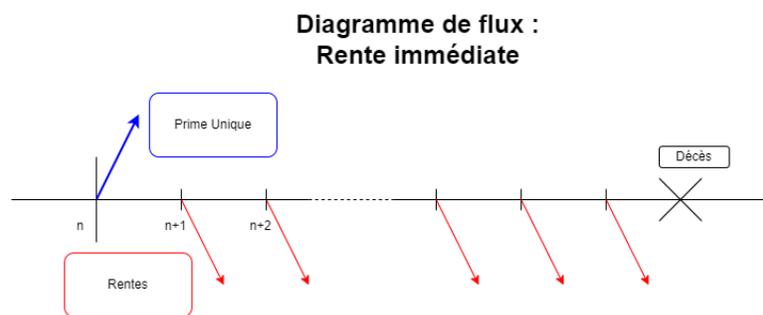


FIGURE 21 – Diagramme de flux : la rente immédiate

3.1.3 La rente viagère différée

Une rente différée est le versement à l'avenir de revenus tant que l'assuré est en vie. Ce revenu n'est pas défini au début du contrat. Ce produit répond aux besoins de planification financière à long terme et de sécurité après la retraite. Concrètement, il s'agit d'une retraite supplémentaire que l'individu se construit. Son fonctionnement se scinde en deux phases :

Phase de constitution

L'assuré finance sa future rente en effectuant des versements réguliers qui alimentent un capital que l'assureur fait fructifier sur les marchés en respectant l'appétence au risque de l'assuré. Un intérêt garanti est crédité à l'épargne chaque année, défini dans les données d'entrée. Jusqu'à la fin de cette phase, le capital appartient pleinement à l'assuré. Celui-ci a donc la possibilité d'effectuer des rachats partiels ou totaux de son contrat. De plus, en cas de décès le capital est reversé à des bénéficiaires.

Il est possible d'activer une option de capital décès pendant cette phase : en

cas de décès avant liquidation, la somme reversée aux bénéficiaires est le maximum entre le capital atteint et un somme assurée définie dans le contrat.

Phase de rente

Une fois la phase de constitution achevée, l'assuré peut choisir de récupérer son capital ou de le convertir en rente. Dans le second cas, la phase de rente débute : le capital atteint est converti en une rente viagère dont le montant des annuités s'obtient en divisant le montant de l'épargne par un facteur de rente. Dès la conversion, l'assuré n'est plus propriétaire d'aucun capital, seule une rente lui est dû jusqu'à sa mort. Pendant la phase de rente, il est possible d'augmenter le revenu en utilisant un taux d'indexation défini en entrée.

Il est possible de définir une garantie de rente. Celle-ci consiste en une période de garantie fixée dans le contrat et qui débute à la date de liquidation. Si l'assuré décède durant cette période, le montant total de rente qui aurait dû lui être versé entre la date de sa mort et celle de fin de la période de garantie est versée en une seule fois à ses bénéficiaires.

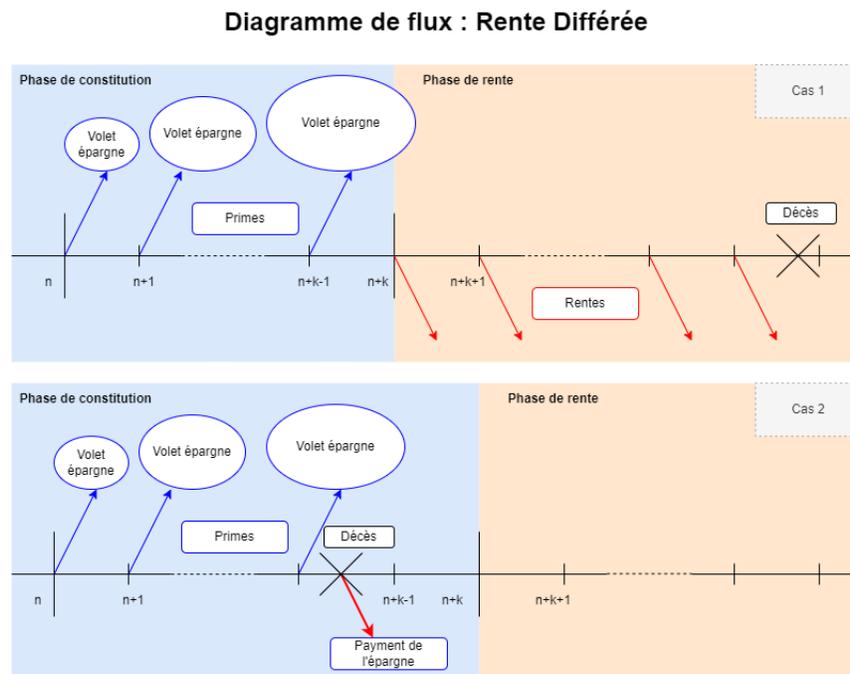


FIGURE 22 – Diagramme de flux : la rente différée

Ce produit est généralement de très long terme : il permet par exemple à l'individu de préparer sa retraite dès ses premières années dans la vie active.

3.2 Les hypothèses sous-jacentes au modèle

Le modèle contient des hypothèses sous-jacentes inhérentes à son fonctionnement. Celles-ci sont :

- Les tables de mortalité sont connues pour des âges entiers. Pour des âges non-entiers, une interpolation est faite sous l'hypothèse de force de mortalité constante. D'autres interpolations seront étudiées en section 8.
- Les décès et les rachats sont supposés avoir lieu en milieu de pas de police.
- Lorsque le contrat est alimenté via une prime unique, celle-ci est supposée versée à la date de début du contrat.
- Lorsque le contrat est alimenté via des primes périodiques, il est supposé que l'ensemble des primes versées durant le pas de police l'est au milieu. Il s'agit d'une approximation de l'hypothèse considérant que les primes sont versées de manière uniforme au cours du pas de police.
- Les coûts de début de contrat sont supposés avoir lieu en début de police, et ceux de renouvellement en milieu de pas de police.
- Les coûts de prestation sont supposés avoir lieu au même instant que le versement des prestations.
- Les commissions initiales sont supposées avoir lieu en début de police et les commissions de renouvellement de contrat en fin de pas de police.

3.3 Les Inputs

Les données à fournir au modèle sont de deux types :

1. Les hypothèses de calcul :

- Hypothèses générales : date d'évaluation, pas de projection, fréquence de projection, devise utilisée.
- Tables de mortalité par genre et statut de fumeur.

- Tables de rachat de contrat et de retrait programmé (concerne la rente différée).
- Hypothèses sur les différents coûts (de police, retrait, etc.).
- Hypothèses sur les commissions.

2. Le portefeuille :

- Données sur la police d'assurance : type de produit, nombre d'assurés, dates d'existence, taux d'intérêt.
- Données sur les assurés : Identifiants, dates de naissance, genres, statuts de fumeur, chargements appliqués.
- Données sur les primes : montant, fréquence, taux d'indexation, etc...
- Données sur les prestations : somme initialement assurée, date de liquidation, fréquence des annuités, revalorisation, etc...

3.4 Cadre de projection

L'objectif de la bibliothèque *Life Cash Flows* est de projeter les flux de trésorerie générés par différents produits d'assurance sur la vie. Pour cela le modèle dispose d'un cadre de projection où l'on renseigne :

- **Un horizon de projection :** Le nombre d'années sur lesquelles la projection s'effectue. Les produits d'assurance sur la vie pouvant aisément s'étendre sur la durée de vie entière d'un individu, celui-ci est généralement de cinquante à cent ans.
- **Une fréquence de projection :** Celle-ci définit la durée d'une étape de projection. Usuellement celle-ci est d'une année. Il est possible de procéder à des pas plus courts (semestriels, trimestriels ou mensuels) afin de gagner en précision à l'échelle infra-annuelle. Néanmoins, cela démultiplie les temps de calcul, ce qui rend utile le développement de méthodes d'optimisation et d'approximation qui seront développées en section 7 et 8.

3.5 Architecture du modèle

Le modèle se décompose en plusieurs modules qui sont des "blocs" permettant de mieux organiser les différentes étapes de la modélisation. Un même module peut être instancié plusieurs fois. Par exemple, le module *Total Cash Flows* qui agrège les flux de trésorerie d'un produit est instancié plusieurs fois : une pour chaque produit. Les modules produits peuvent également être instanciés plusieurs fois s'il y a volonté de séparer des portefeuilles. Le modèle *Life Cash Flows* est composé ainsi :

- Un module principal *Life Cash Flows Model* qui charge les données et hypothèses depuis l'input et qui organise les sous-modules.
- Un module *Aggregated Total Cash Flows* qui agrège les flux des différents produits modélisés.
- Un module *Total Cash Flows* instancié pour chaque produit et qui agrège les flux générés par ce produit.
- Un module produit qui calcule les flux de trésorerie (ici : *Term*, *Annuity Immediate*, *Annuity Deferred*).
- Des modules *ALM_Export* et *IFRS17_Export* qui récupèrent les données nécessaires et les exportent dans leur solution respective.

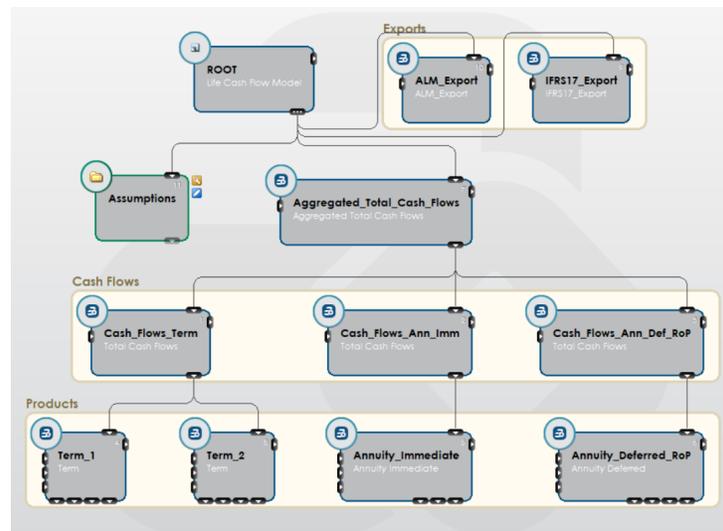


FIGURE 23 – Architecture de modèle *LCF*

3.6 Modules d'agrégation des flux

Il existe deux modules d'agrégation des flux :

1. Le module *Aggregated Total Cash Flows*

Ce module permet l'agrégation de tous les flux de trésorerie par produit. L'intérêt de sa structure est qu'on peut aisément supprimer ou ajouter des produits afin de l'adapter aux besoins des utilisateurs.

2. Le module *Total Cash Flows*

Ce module instancie un module produit et agrège tous les flux de trésorerie qui y ont été modélisés :

- Les flux de primes
- Les flux de prestations (rentes, décès, rachats, etc.)
- Les flux de coûts (frais liés aux prestations, primes, etc.)
- Les flux de commissions
- Les flux totaux

Il permet également de sortir du cadre de distribution, une méthode d'optimisation détaillée en section 8.

3.7 Les modules produit

Ils ont tous une structure similaire. Nous prendrons l'exemple du module *Term* qui modélise la temporaire décès. Ce module charge les données et hypothèses depuis le module principal et organise les sous-modules.

Il instancie les modules suivants :

- *Policy_data* : Récupère le portefeuille de contrats et calcule les informations déductibles qui seront utiles pour les autres modules.

- *Projected_Policy_Data* : Projette les informations du portefeuille jusqu'à l'horizon.
- *Probabilities* : Détermine les différentes probabilités nécessaires à la modélisation du produit.
- *Premiums* : Calcul les flux de primes au cours de la projection.
- *Benefit_Death* : Calcul les flux de prestation décès au cours de la projection.
- *Policy_Expenses, Premium_Expenses* : Calcul les coûts, respectivement liés à la police d'assurance et à la gestion des primes.
- *Commissions* : Calcul les commissions.
- *Adjustment_Coefficient, Adjustment_Export* : Sert au coefficient d'ajustement, développé dans la partie sur le provisionnement.
- *Mathematical_Reserve* : Calcul la provision mathématique.
- *Discount_Rates* : Projette le facteur d'actualisation.
- *Statistics* : Calcul des informations statistiques sur le produit du portefeuille.
- *ALM_Export, IFRS17_Export* : Récupère et réorganise les données calculées sur le produit pour permettre un export efficace.

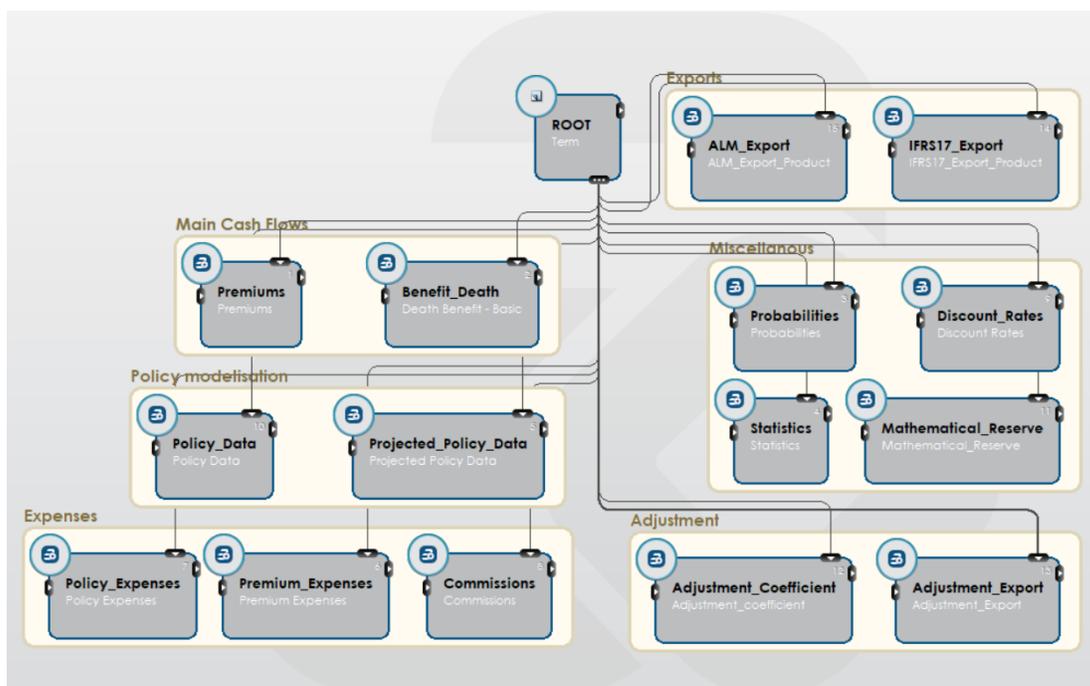


FIGURE 24 – Architecture du module de temporaire décès

3.8 Les modules d'export

Pour chaque solution à alimenter, il y a un module d'export "local" au sein du produit qui réorganise les flux pour qu'ils soient prêt à l'exportation, et un module d'export "globale" au niveau du modèle principal qui agrège les flux des modules précédents le long des produits et et effectue les exports.

3.9 Recette

La bibliothèque *Life Cash Flows* est amenée à subir de nombreux développements au cours des années. Une pratique professionnelle saine est alors la mise en place d'un processus de recette afin de contrôler le bon déroulement de ces développements.

Ce processus consiste en un fichier excel qui récupère et compare les sorties générées par deux versions du modèle. Cela permet d'effectuer des tests de non régression, c'est à dire de contrôler que les différences entre une nouvelle version avec celle antérieure sont cohérentes avec les développements effectués, ce qui offre une forme de vérification, notamment sur le fait de ne pas avoir dégradé d'autres parties du modèles.



FIGURE 25 – Validation des données globale

Nous pouvons voir sur la figure 25 que les développements effectués ont altéré les flux de la temporaire décès ainsi que les flux totaux. Le premier écart est naturellement la cause du second.

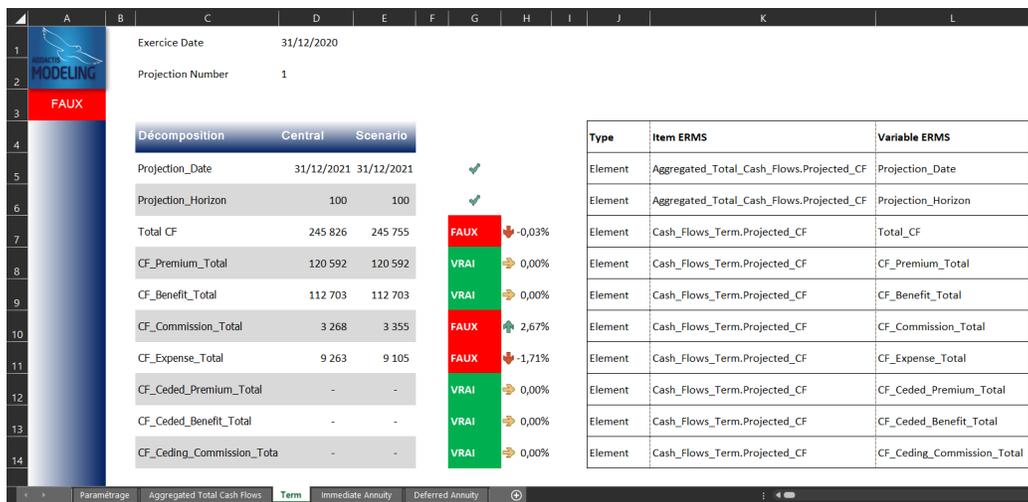


FIGURE 26 – Validation des données locales

La figure 26 se montre plus précise et indique que l'écart observé sur le produit décès est dû au montant des commissions qui a augmenté et à celui des coûts qui a diminué. Le tableau à droite indique l'emplacement du modèle où sont les calculs.

Notons cependant que les tests de non-régression peuvent ne pas couvrir intégralement le modèle, en particulier les nouvelles fonctionnalités. Il est alors nécessaire d'effectuer des tests unitaires, c'est à dire des test conçus spécifiquement pour évaluer les nouvelles fonctionnalités. Cela demande entre autre une rigueur métier afin d'anticiper les situations particulières qui pourrait engendrer des résultats anormaux.

Les tests de performance sont également essentiels afin de s'assurer que de nouveaux développements ne dégradent pas déraisonnablement la durée des calculs. En effet, le temps d'exécution étant un critère fondamental de la pertinence de la bibliothèque, tout développement doit faire l'objet d'attention en terme de temps de calcul qu'il ajoute au modèle.

III

Cas d'usage

4 Provisionnement

Afin d'alimenter les différents modèles cibles, la bibliothèque *Life Cash Flows* doit être en mesure de fournir une provision mathématique car il s'agit d'un élément clef pour les modèles. Par exemple, elle est à la base de la ventilation de la participation au bénéfice pour le modèle ALM et de la détermination des unités de couverture pour la solution IFRS 17. De par son objectif multinorme, la bibliothèque doit permettre une modélisation souple de la provision mathématique afin de s'adapter aux différentes réglementations.

4.1 Calcul de la provision mathématique comptable

Dans toute cette partie, les projections sont supposées à pas annuel et les échéances de flux en fin d'année. Les cas généraux s'obtiennent à partir d'ajustements élémentaires.

Définition : VAP assureur et VAP assuré

L'engagement d'une partie (l'assureur ou l'assuré) à la date t correspond aux montants que cette partie devra verser à l'autre. On considère alors la valeur actuelle probable (VAP) de cet engagement :

$$VAP(t) = \sum_{k \geq t+1} CF_k(t) \cdot v_k$$

où :

- v_k est le facteur d'actualisation en k
- $CF_k(t)$ est le flux de trésorerie en k vu au pas t , c'est à dire le montant versé ou perçu en k pondéré par sa probabilité d'être versé ou perçu au vu des informations disponibles au pas t .

Définition : Provision mathématique

Afin de garantir d'être en mesure de respecter ses engagements envers ses assurés, un assureur doit détenir dans ses comptes un montant spécifique rattaché à ces engagements : il s'agit de la provision mathématique (PM). Concrètement, la provision mathématique est la différence entre les valeurs actuelles probables des engagements respectivement pris par l'assureur et par les assurés.

À la souscription du contrat, il y a, par construction de la prime, un équilibre entre ces deux engagements et donc la PM est nulle. Une fois les premières primes versées, un déséquilibre s'instaure et la provision mathématique en t est :

$$PM(t) = VAP_{assureur}(t) - VAP_{assuré}(t)$$

Il s'agit d'un élément fondamental du bilan, elle s'inscrit au passif et représente l'engagement net qu'a l'assureur envers l'assuré. Sa contrepartie à l'actif correspond aux primes reçues que l'assureur détient sous forme d'actifs (trésorerie, placements, etc.).

Allures qualitatives de la provision mathématique

Les graphiques ci-dessous illustrent les différentes allures de courbes que peuvent donner les engagements en fonction des produits. Les valeurs exactes dépendent de nombreux paramètres (taux technique, frais, participation aux bénéfices, etc.), mais la forme des courbes est globalement identique.

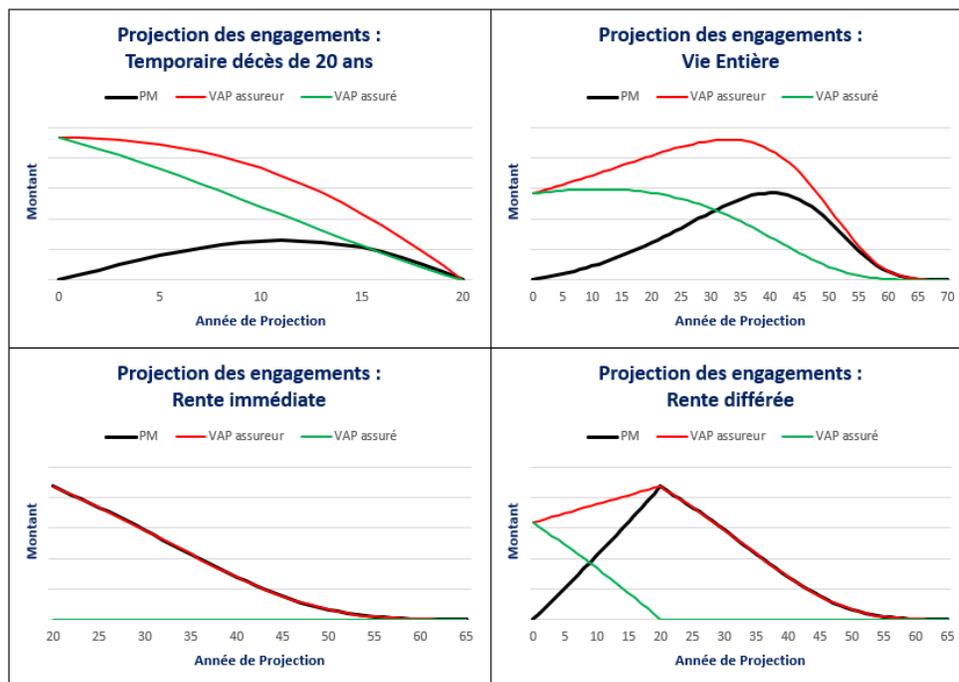


FIGURE 27 – Différentes évolutions de la provision mathématique.

Remarquons que la PM est :

- Toujours nulle en 0 : équilibre des engagements actuariels à la création du contrat.
- Toujours nulle en fin de contrat : disparition des engagements des deux partis.
- Toujours positive : l'engagement de l'assureur est toujours supérieur à celui de l'assuré.

Dans le cas des assurances décès, la positivité de la PM peut se voir comme conséquence de la croissance de la mortalité : le montant des primes payées par l'assuré est constant mais sa probabilité de décès croissante. Pour conserver l'équilibre actuarielle global, l'assuré est donc sur-tarifé en début de contrat et sous-tarifé en fin de contrat, d'où un engagement assureur au moins égal à l'engagement assuré.

Concernant la rente différée, l'engagement de l'assuré diminue dû au versement des primes, et l'engagement de l'assureur augmente dû à la désactualisation du montant à verser. Après liquidation, l'assuré n'a plus d'engagement envers l'assureur donc l'engagement de l'assureur et la provision se confondent.

Il existe deux principales méthodes de projection de la provision mathématique dans le cadre d'un modèle de produits vie.

4.1.1 Méthode Prospective

Cette méthode consiste à rester sur la définition de la provision mathématique : il s'agit de la calculer sur base des flux de trésorerie futurs qui sont recalculés à chaque pas de projection.

Considérons n chroniques de montants $(M_{1,k})_{k \geq 1}, \dots, (M_{n,k})_{k \geq 1}$ que l'assureur verse ou perçoit (prestations, primes, frais, etc.). Les montants sont algébriques, c'est à dire qu'ils sont négatifs si l'assureur les reçoit et positif s'il les verse. Au pas t , le flux de trésorerie total en k est :

$$CF_k^{total}(t) = \sum_{i=1}^n M_{i,k} \cdot \mathbb{P}_{i,k}(t)$$

où $\mathbb{P}_{i,k}(t)$ est la probabilité, lors du pas de projection t , que le montant en k de la chronique i soit versée.

On a alors :

$$PM(t) = \sum_{k \geq t+1} CF_k^{total}(t) \cdot v_k$$

Notons que l'évolution de la provision mathématique au cours de la projection est entièrement dû à la dépendance en t des probabilités de versement. Les montants sont déterministes puisqu'à ce stade la participation aux bénéfices n'a pas été appliquée.

Cette méthode présente l'avantage de s'adapter simplement aux hypothèses de provisionnement (tables de mortalité, taux, etc...) Néanmoins, elle peut être coûteuse en calcul puisqu'elle nécessite de recalculer les probabilités à chaque pas de projection ce qui engendre une complexité quadratique.

4.1.2 Méthode Rétrospective

Cette méthode consiste à faire évoluer la provision mathématique sur base de la capitalisation de celle antérieure et de l'ajout des flux versés lors du pas de projection. La méthode consiste à appliquer le processus suivant :

1. D'abord, la provision à l'initialisation peut être en input du modèle (calculée par le service inventaire) ou éventuellement déterminée de manière prospective au pas 0.
2. Ensuite, à chaque pas de projection :
 - On capitalise la PM du pas précédent.
 - On ajoute à la PM les flux entrants et on y retire les flux sortants.

On obtient ainsi l'expression de la provision mathématique à chaque pas par récurrence :

$$PM(t) = \frac{PM(t-1)}{1+i_t} + CF_t^{entrants} - CF_t^{sortants}$$

où i_t est le taux d'actualisation à an (pour des pas annuels) à la date t .

Cette méthode est bien moins coûteuse que la précédente (complexité linéaire) mais présente l'inconvénient d'être rigide aux hypothèses de provisionnement.

Le graphique suivant illustre la méthode rétrospective en tenant compte de la possibilité pour les flux de tomber en cours de pas de projection, ce qui implique une capitalisation mais sur une durée différente de celle de la provision mathématique.

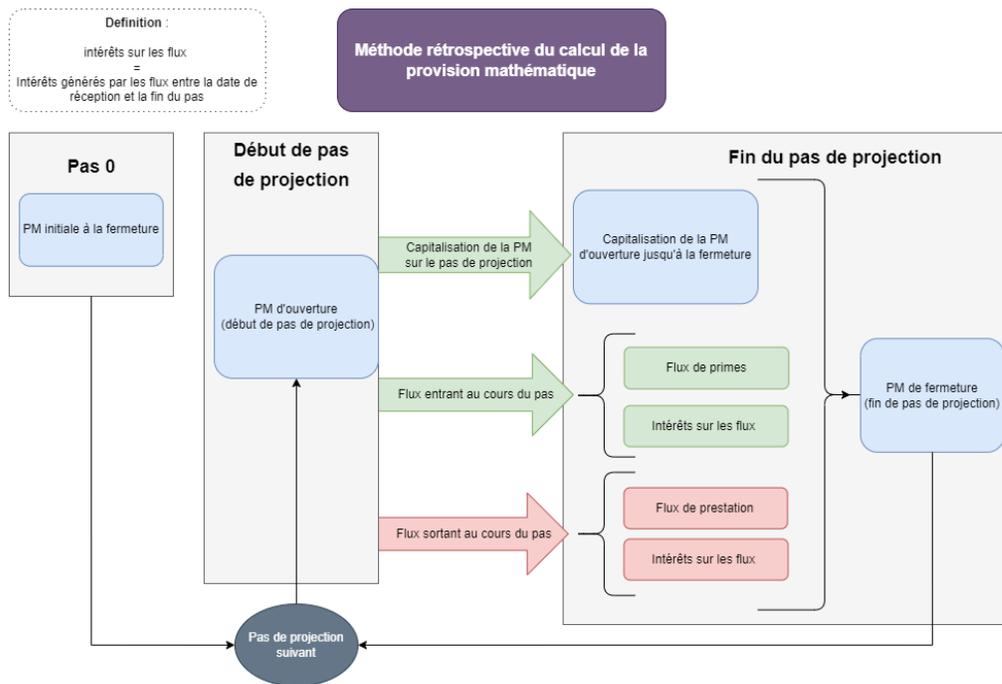


FIGURE 28 – Calcul rétrospective de la provision mathématique

4.2 La provision mathématique sous la réglementation française

La bibliothèque *Life Cash Flows* doit pouvoir fournir des résultats conformes aux réglementations locales des pays dans lesquels elle est utilisée. Nous prenons l'exemple de la France pour illustrer le type d'adaptation dont elle doit être capable.

Il est indiqué dans l'article A132-18 du code des assurances que le calcul de la PM fait intervenir deux paramètres clefs soumis à réglementation :

- **Le taux technique :** Il s'agit à la fois du taux d'actualisation des flux de la PM et du taux de rendement minimum garanti par le contrat.
- **Les tables de mortalités :** Elles sont sous-jacentes aux probabilités liées au flux de trésorerie.

4.2.1 Le taux technique

Les contraintes sur les taux techniques sont fixées aux articles A132-1 et A132-1-1 du code des assurances où il est défini un taux technique maximal. Celui-ci est une mesure de protection vis-à-vis des consommateurs et des entreprises contre les risques associés à des promesses de rendements excessivement élevés qui pourraient découler de surenchères entre les assureurs pour attirer des clients. Le taux technique maximal est défini à partir des taux moyens d'état et peut se synthétiser dans le tableau suivant :

Valeur maximale du taux technique		
Type de contrat	Contrat de plus de 8 ans, à primes périodiques, ou à capital variables	Autre
Taux de référence mensuel (TRM)	60% du TME	75% du TME
Taux technique maximal	$\min(TRM; 3,5\%)$	TRM
Mise à jour	TRM \searrow 0,1 ou \nearrow 0,35	
Particularité	Arrondi au multiple de 0,25% inférieur et minoré par 0	

Le graphique ci-dessous permet de voir les différentes étapes de construction du taux technique maximal ainsi que son évolution :

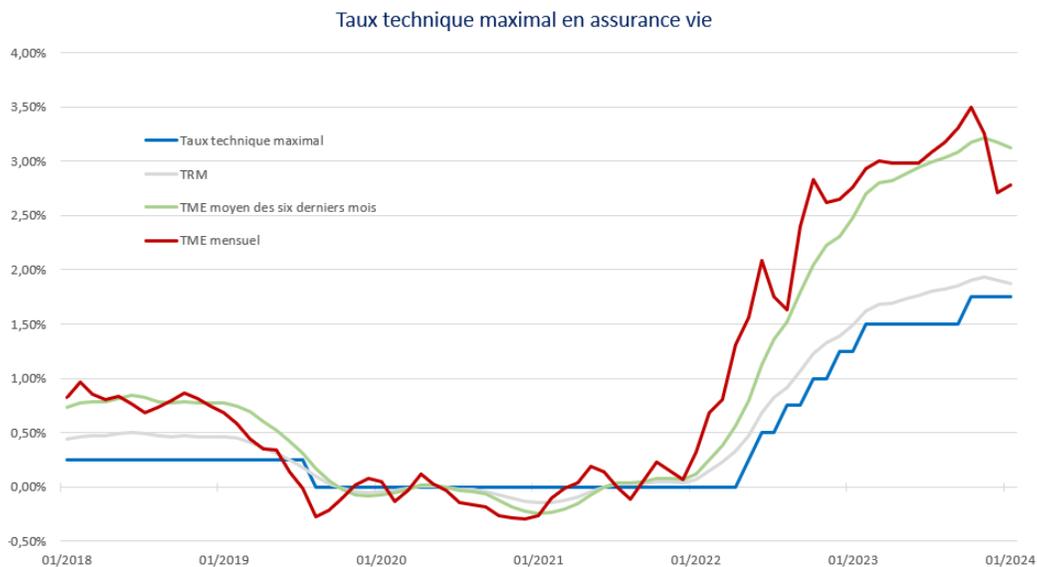


FIGURE 29 – Evolution du TME et du taux technique maximal depuis 2018

Comme observé sur l'année 2018, la règle sur l'échelle de valeurs évite des mises à jour trop fréquentes du taux technique maximal qui engendreraient des coûts inutiles pour les assureurs. Elle limite également l'impact de variations brusques sans changement de tendance, comme observé en 2022. La minoration à zéro assure la garantie totale des montants investis par les assurés. Non activée ces dernières années, la majoration à 3,5% est spécifique aux périodes de taux élevés pour prévenir des garanties non soutenables en cas de retour à la normale des taux.

4.2.2 Les tables de mortalité

En France, l'article A132-18 du code des assurances donne deux possibilités pour l'utilisation des tables de mortalité. Celles-ci se synthétisent dans le tableau ci-dessous :

	Option 1	Option 2
Table utilisée	Table homologuée	Table propre à la compagnie
Données de référence	Populations d'assurés pour les rentes viagères et données de l'IN-SEE pour les autres contrats	Données d'expérience ou démographiques équivalentes
Conditions	Homologuée par arrêté du ministre de l'économie et des finances	Doit être certifiée par un actuaire agréé indépendant

4.2.3 Divergences entre les normes

Ces contraintes de la réglementation française illustrent les écarts pouvant exister entre les différentes normes. En effet, on peut effectuer une comparaison avec la provision mathématiques sous norme française, le *Best Estimate* de solvabilité 2 et le *Current Estimate* de IFRS 17 :

Ces trois notions consistent toutes en une estimation de la valeur actualisée probable des flux futurs. Néanmoins elles divergent sur de nombreux points :

- La frontière des contrats.
- Le périmètre des flux à considérer.
- La courbe des taux à utiliser.
- Les tables de mortalités.

Par exemple, là où la norme française demande à ce que l'actualisation de la

PM soit effectuée via un taux fixe, Solvabilité 2 base son *BE* sur l'utilisation de courbes des taux fournies par l'EIOPA, et IFRS 17 donne seulement des principes à respecter pour le choix de la courbe des taux. De même, alors que les tables de mortalité pour le calcul de la provision mathématique française sont imposées par l'autorité des normes comptables, celles utilisées pour l'estimation du *Best Estimate* doivent refléter "des informations actualisées et crédibles et des hypothèses réalistes".

Les normes locales des pays à l'international sont également pleinement susceptibles de poser des exigences différentes, nécessitant donc que la modélisation de la provision au sein de la bibliothèque *Life Cash Flows* soit développée de sorte à être flexible à face à cette diversité réglementaire.

4.3 Calcul de la PM au sein du modèle LCF

Afin de répondre à ce besoin, le calcul de la provision mathématique au sein du modèle *Life Cash Flows* utilise une adaptation de la méthode prospective. Le modèle effectue une double exécution, ce qui permet :

- De considérer des hypothèse (ex : tables de mortalité) différentes pour la projection comptable et la projection réelle sans recalculer tous les flux à chaque nouveau pas.
- D'utiliser un coefficient d'ajustement afin d'adapter les flux modélisés à une provision fourni en entrée du modèle.

La première exécution effectue une projection que l'on qualifie de "projection comptable" : elle calculera un coefficient d'ajustement et utilisera les tables de mortalité réglementaires pour calculer une provision mathématique comptable non ajustée.

La seconde exécution effectuera une projection que l'on qualifiera de "projection réelle" : elle se servira des résultats de l'exécution précédente pour déterminer des flux ajustés, ainsi qu'une projection de la provision mathématique ajustée.

Cette méthode permet à la fois de gérer les différences réglementaires via la changement d'hypothèse entre les deux exécutions du modèle, et de gérer les écarts méthodologiques via le coefficient d'ajustement.

4.3.1 Changement de tables de mortalités

Nous illustrons le changement d'hypothèse par un changement des tables de mortalité. On considère les notations suivantes :

- x : l'âge de l'assuré.
- ω : âge maximal atteignable selon les tables de mortalité.
- r_i : le taux d'actualisation en i .
- ${}_i p_x$: Probabilité qu'un assuré d'âge x survive pendant au moins i années selon la table de mortalité réglementaire (utilisée en projection comptable).
- ${}_i \tilde{p}_x$: Probabilité qu'un assuré d'âge x survive pendant au moins i années selon la table de mortalité de projection réelle.
- $\mathbb{P}_{k,x}^{IF}$: la probabilité, selon la table réglementaire, que le contrat sur un assuré d'âge x soit en cours (*In Force*) lors du pas de projection k . Dans le cas d'une rente immédiate : $\mathbb{P}_{k,x}^{IF} = \prod_{i=0}^{k-1} {}_1 p_{x+i}$.
- $\tilde{\mathbb{P}}_{k,x}^{IF}$: la variable similaire dans le cadre d'une table de mortalité autre.
- $PM(k)$: la provision mathématique en utilisant la table réglementaire pour les deux dimensions de projection.
- $\tilde{M}(k)$: la provision mathématique en utilisant la table réglementaire pour la projection comptable et une autre table pour la projection réelle.

Il existe deux dimensions de projections :

- **La projection comptable** : Celle utilisée pour la projection des flux pour le calcul de la PM selon la norme locale du pays où est utilisé le modèle.
- **La projection réelle** : Celle utilisée pour la projection du modèle de manière général. La table de mortalité sous-jacente est au choix de l'assureur.

Par exemple, Dans le cadre d'une projection S2 en norme française, on peut être amené à utiliser une table de mortalité spécifique pour la projection, notam-

ment en cas de scénario de choc, mais à utiliser une table réglementaire pour le calcul de la PM. Le schéma ci-dessous illustre, dans le cadre d'une rente unitaire immédiate, les différentes probabilités intervenant le long des deux types de projections.

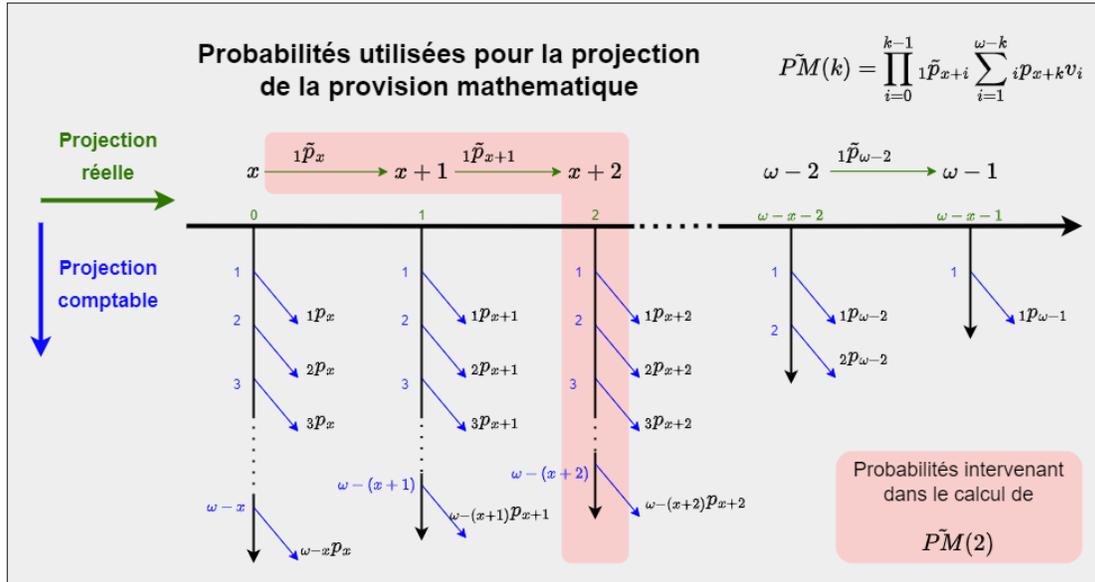


FIGURE 30 – Double projection pour le calcul de la provision mathématique

Lorsque la table pour la projection du portefeuille diffère de celle pour le calcul de la provision mathématique ($\tilde{p} \neq p$), le modèle *Life Cash Flows* peut calculer la provision mathématique en projection sans avoir à recalculer les flux à chaque pas. Détaillons le cas d'une rente unitaire immédiate :

Pour chaque assuré, la PM lors de la projection k est égale à la probabilité que le contrat soit en cours en k (i.e. l'assuré vivant) multipliée par la PM de cet assuré s'il est effectivement vivant. Lors de sa première exécution, le modèle *Life Cash Flows* utilise la table de mortalité réglementaire et obtient donc la provision suivante :

$$PM(k) = \mathbb{P}_{k,x}^{IF} \sum_{i=1}^{\omega-k} i p_{x+k} v_i$$

Lors de la seconde exécution, le modèle doit obtenir la provision suivante :

$$\tilde{P}M(k) = \tilde{\mathbb{P}}_{k,x}^{IF} \sum_{i=1}^{\omega-k} i p_{x+k} v_i$$

Or, on déduit de ces deux formules la relation :

$$\tilde{P}M(k) = \frac{\tilde{\mathbb{P}}_{k,x}^{IF}}{\mathbb{P}_{k,x}^{IF}} PM(k)$$

Ce qui permet d'obtenir la provision mathématique sans recalculer les sommes de flux à chaque pas, et sans avoir à implémenter une gestion des changements de table de mortalité. De plus, cette méthode peut être plus fine en s'appliquant directement aux valeurs actuelles probables des engagements assureur et assuré ; la PM s'en déduisant ensuite par différence.

4.3.2 Ajustement de la PM et des flux

Outre la gestion des hypothèses selon la dimension de projection afin de gérer les différences réglementaires, il peut exister des écarts méthodologiques (ex : interpolation différente) entre les provisions calculées par le modèle et celles calculées par le service inventaire. Par conséquent, le modèle peut ajuster les provisions et les flux modélisés pour être en cohérence avec les provisions mathématiques du service inventaire.

Pour cela, dans sa première exécution le modèle calcul une PM selon sa propre méthodologie puis se sert d'une PM fourni en entrée afin de déduire un coefficient d'ajustement par ratio des deux provisions. Dans sa seconde exécution, le modèle applique l'ajustement aux caractéristiques des contrats dans les hypothèses en amont des calculs (somme assurée, rente initiale, etc.) afin que les flux calculés soient tous ajustés. Parallèlement, il se sert du coefficient d'ajustement et de la PM de la première exécution pour calculer et projeter la provision mathématique ajustée.

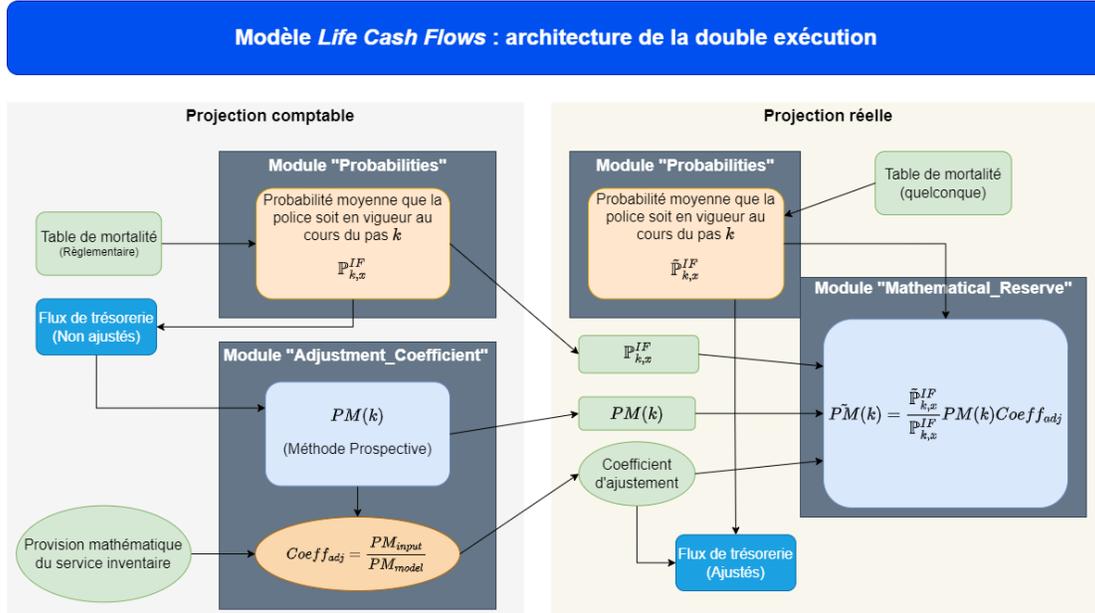


FIGURE 31 – Provision mathématique et Coefficient d'ajustement

De plus, comme précédemment, cette méthode peut être plus fine en s'appliquant directement aux valeurs actuelles probables des engagements assureur et assuré; la PM s'en déduisant ensuite par différence.

4.3.3 Les intérêts techniques

Les intérêts techniques au pas k , IT_k , sont les intérêts générés pour passer de la PM en $k - 1$ à la PM en k . Il s'agit donc de la différence entre la PM actualisée au taux technique i et la PM non actualisée. Lorsque les flux tombent en fin de pas, on a :

$$PM(k) = PM(k - 1) + IT_k - CF_k$$

Or,

$$PM(k) = (1 + i)PM(k - 1) - CF_k$$

donc

$$IT_k = iPM(k - 1)$$

Lorsque les flux sont supposés tombés en milieu de pas, comme pour le modèle *Life Cash Flows*, la formule des intérêts techniques est différente. Notons :

- $IT_{k-\frac{1}{2}}$ les intérêts sur la première moitié du pas k
- $IT_{k-\frac{2}{2}}$ les intérêts sur la seconde moitié du pas k
- $IT_k = IT_{k-\frac{1}{2}} + IT_{k-\frac{2}{2}}$ les intérêts sur le pas k
- $CF_{k-\frac{1}{2}}$ le flux tombant au cours du pas, supposé tomber au milieu.

On a alors, d'une part :

$$\begin{cases} PM_{k-\frac{1}{2}} = (1+i)^{\frac{1}{2}} PM_{k-1} - CF_{k-\frac{1}{2}} \\ PM_k = (1+i)^{\frac{1}{2}} PM_{k-\frac{1}{2}} \end{cases}$$

Ce qui donne

$$PM_k = (1+i)PM_{k-1} - (1+i)^{\frac{1}{2}}CF_{k-\frac{1}{2}}$$

Et d'autre part :

$$\begin{cases} PM_{k-\frac{1}{2}} = PM_{k-1} + IT_{k-\frac{1}{2}} - CF_{k-\frac{1}{2}} \\ PM_k = PM_{k-\frac{1}{2}} + IT_{k-\frac{2}{2}} \end{cases}$$

Ce qui donne

$$PM_k = PM_{k-1} - CF_{k-\frac{1}{2}} + IT_k$$

On en déduit donc :

$$\boxed{IT_k = i \cdot PM_{k-1} - ((1+i)^{\frac{1}{2}} - 1)CF_{k-\frac{1}{2}}}$$

Les intérêts techniques sont à la base du calcul de la participation au bénéfice, ils représentent la rémunération minimale que l'assureur doit reverser aux assurés.

5 Le modèle *LCF* au sein du modèle ALM

5.1 Les modèles ALM

En assurance vie, les nombreuses interactions entre l'actif et le passif nécessitent des modèles complexes capables de tenir compte de toutes ces inter-dépendances. Ainsi, les modèles de gestion actifs-passifs, ou modèle ALM (*Asset Liability Management*) ont pour but de modéliser l'ensemble de ces interactions, ce qui implique de tenir compte non seulement de caractéristiques financières (évolutions des marchés), mais aussi de comportement des assurés (rachats conjoncturels) ou des politiques de gestion (taux de participation aux bénéfices).

De plus, certains options et garanties liées aux contrats d'assurance sur la vie (ex : taux minimum garantie annuel) évoluent de manière non linéaire en les scénarios économiques. Lorsqu'elle existe, cette partie des flux nécessite donc une projection stochastique pour calculer le *Best Estimate* puisque les flux selon le scénario moyen ne correspondent plus à l'espérance des flux le long des scénarios. Cette projection stochastique peut également se faire au sein d'un modèle ALM.

5.2 L'ALM en *flexing*

Les modèles ALM sont généralement stochastiques afin de tenir compte de l'ensemble des évolutions possibles de l'actif et de son impact sur le passif, notamment par le biais de la participation aux bénéfices. Ainsi, afin de réduire la complexité et la durée des calculs, la méthode de *flexing* vient simplifier la modélisation en effectuant des calculs en deux temps :

- **Modélisation déterministe indépendante du passif** : les engagements non revalorisés sont modélisés tête par tête via un modèle de passif : il s'agit ici du modèle *Life Cash Flows*.
- **Modélisation tenant compte de l'actif et possiblement stochastique** : Sur la base des engagements obtenus avec le modèle de passif, le modèle ALM va ajouter les engagements liés à l'actif et au stochastique.

Le modèle de passif projette tête par tête les engagements garantis à la date d'évaluation et permet ainsi de construire les flux de trésorerie qui seront utilisés dans le modèle ALM. Ces flux sont ensuite complétés au sein du modèle ALM afin de tenir compte des règles de pilotage et de revalorisation du passif en fonction des évolutions économiques.

Le modèle *Life Cash Flows* générant des flux déterministes, il ne peut

modéliser la partie stochastique des flux. Son objectif est alors d'alimenter le modèle ALM d'addactis en *flexing* afin que ce dernier s'occupe de revaloriser les flux et la provision mathématique.

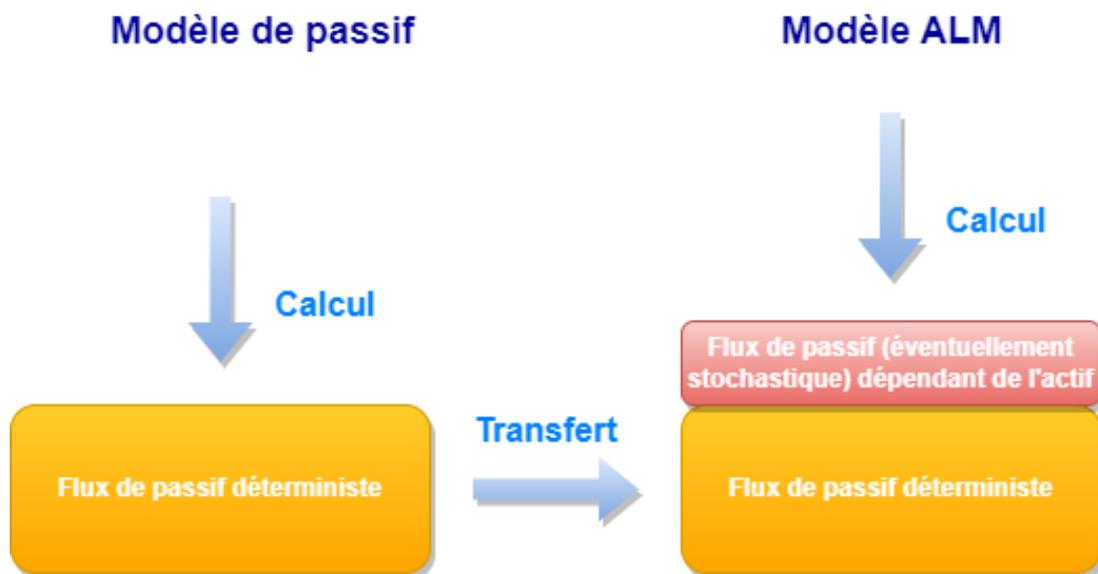


FIGURE 32 – Méthode du *flexing*

Les flux stochastiques correspondent notamment à la participation aux bénéfices, détaillée dans la section suivante, mais peuvent également correspondre :

- Au taux minimum garanti annuel : il s'agit d'un taux garanti annuellement à l'assuré (au-delà du TMG), qui est redéfini chaque année et dont le montant peut dépendre du scénario économique.
- Aux rachats conjoncturels (ou dynamiques) : il s'agit des rachats qui dépendent de la situation économique, et sont donc stochastiques.

5.3 Modélisation de la participation aux bénéfices

Au delà du taux minimum garanti par les contrats, l'assureur doit reverser aux assurés un taux de rendement supérieur en fonction des bénéfices réalisés par l'entreprise : il s'agit de la participation aux bénéfices (PB). Celle-ci se base sur les résultats techniques et financiers, qui correspondent respectivement aux résultats liés à l'activité assurantielle et liés aux rendements des actifs financiers.

Cette participation peut prendre la forme d'une augmentation de la valeur du contrat pour les contrats à dimension épargne, et d'une réduction de primes pour

les contrats de prévoyances. Elle permet à l'assureur de rendre ses produits plus attractifs dans un contexte concurrentiel, mais une réglementation existe également pour le contraindre à redistribuer ses bénéfices car ceux-ci peuvent découler, par exemple, de frais trop élevés ou d'une sur-tarification pour les bénéfices techniques, et de rendements réalisés grâce à l'argent des assurés pour les bénéfices financiers.

La part de bénéfice à redistribuer est calculée selon des critères définis par l'assureur, souvent en fonction de la performance des investissements et des résultats financiers de l'entreprise.

5.3.1 Réglementation française sur la PB

La non-linéarité en les scénarios économiques peut être illustrée à travers la réglementation française. En France en assurance vie, l'entreprise doit au minimum redistribuer à ses assurés

- 90% des bénéfices techniques.
- 85% des bénéfices financiers.

L'assureur peut également doter une provision de participation aux excédent (PPE) qui lui sert à lisser son résultat et les revalorisations reversées sur plusieurs années. Pour cela, il peut doter la provision lors des années à haut bénéfices et la prélever lors des années à bénéfices bas. Il doit cependant redistribuer sa PPE dans une limite de huit ans. La ventilation de la participation au bénéfice reste libre à l'assureur.

Ces règles créent une asymétrie sur les montants à verser en fonction des résultats de l'entreprise. Néanmoins, il s'agit là de montants minimums et les règles de pilotage de l'entreprise peuvent accentuer ou réduire cette symétrie. En pratique, la participation aux bénéfices n'est pas nécessairement modélisée de manière stochastique.

5.3.2 Application d'un taux d'indexation

La participation aux bénéfices peut se modéliser de deux manières : l'application d'un taux d'indexation ou l'utilisation d'un algorithme spécifique de participation au bénéfice.

L'utilisation du taux d'indexation peut se faire directement au sein de modèle *Life Cash Flows* et évite donc le recours au modèle ALM. Pour chaque produit, il est possible d'utiliser un taux d'indexation défini en entrée pour augmenter annuellement les différents flux de prestation. Ce sera utilisé pour calculer la participation aux bénéfices de manière simple.

Cette méthode convient aux compagnies qui calculent déjà la participation aux bénéfices en utilisant un taux et pour les produits avec un taux d'indexation défini et sans PB.

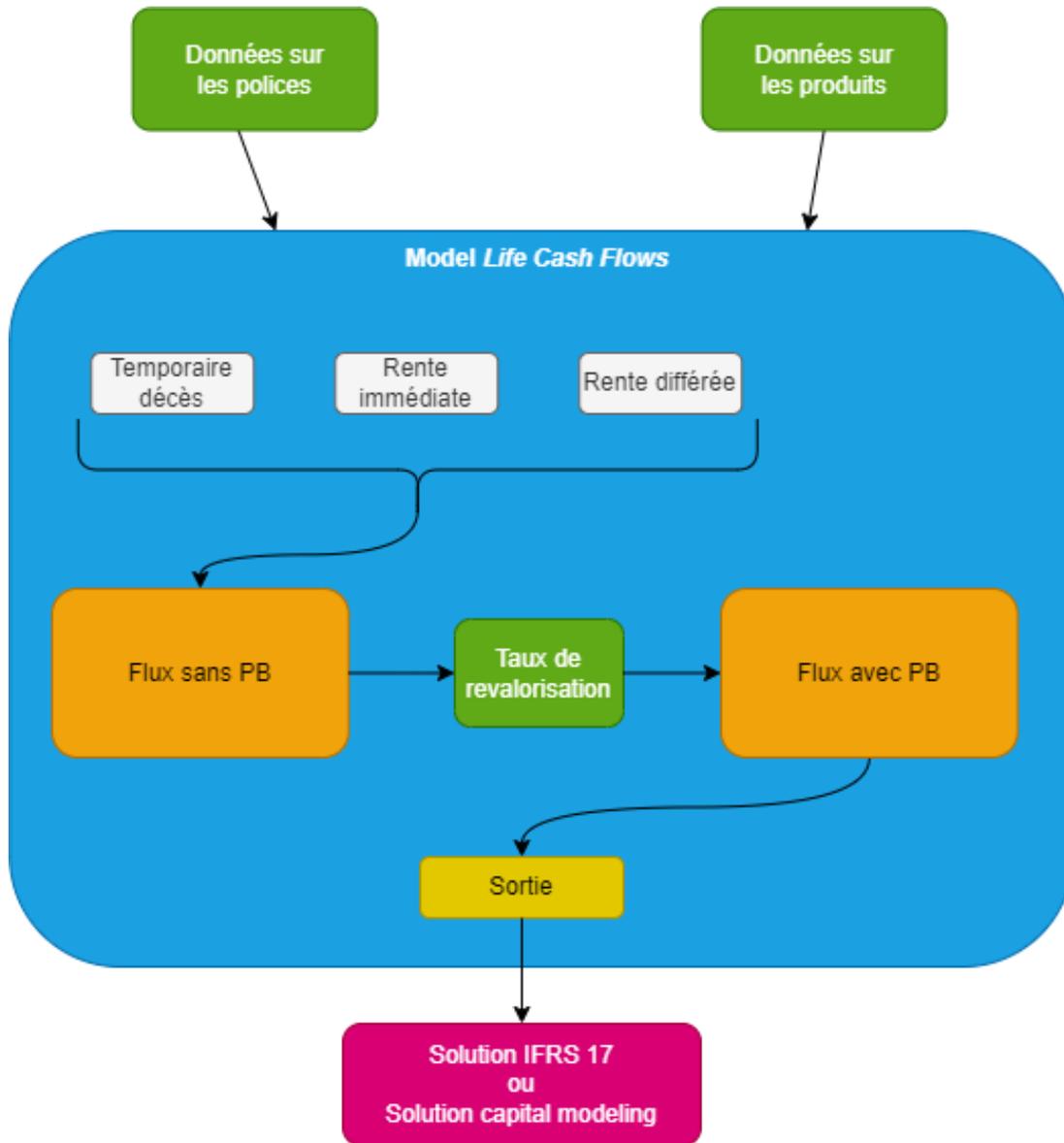


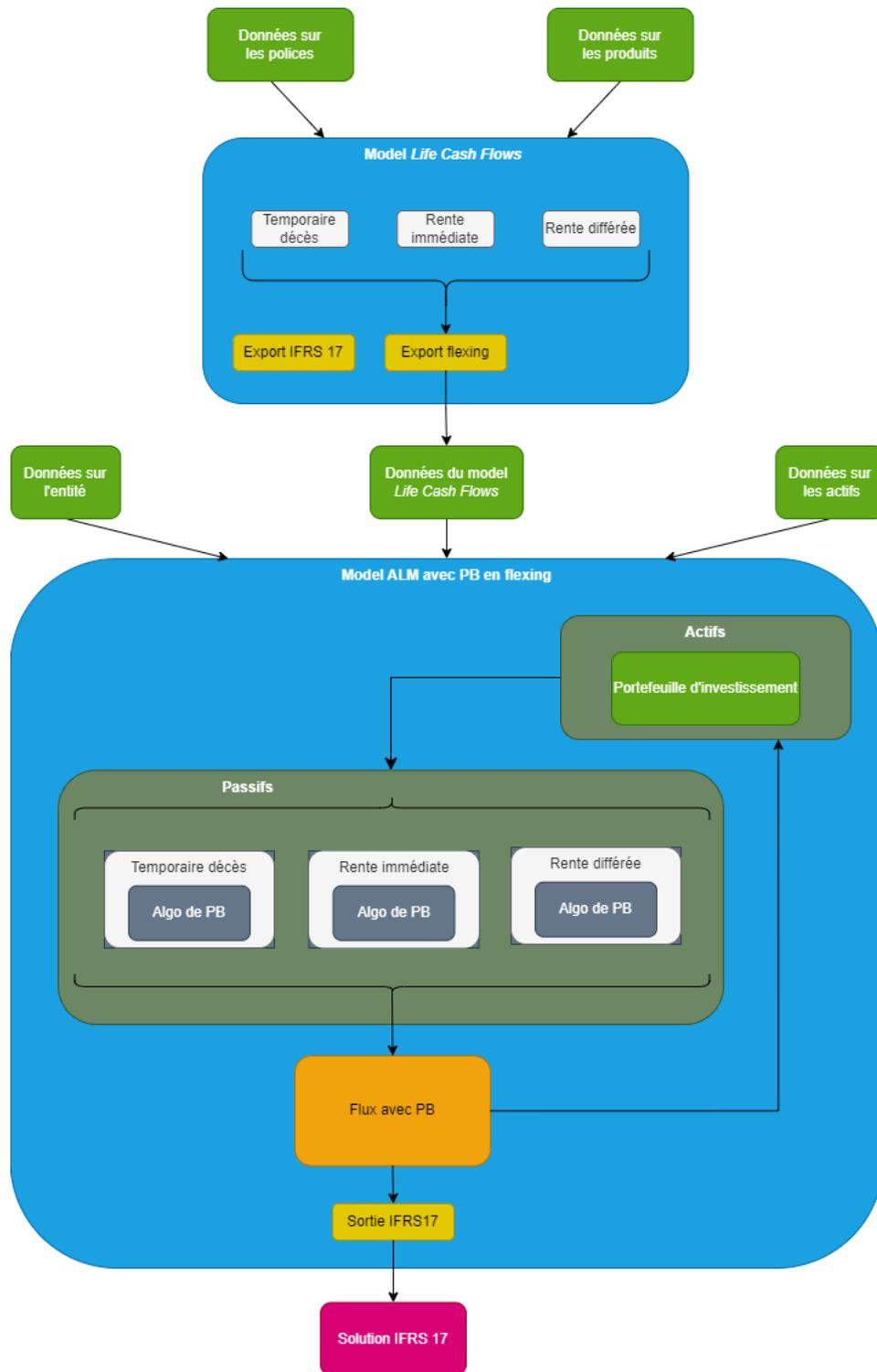
FIGURE 33 – Architecture de la PB via un taux d'indexation

5.3.3 Méthode de *flexing*

La seconde méthode consiste à alimenter le modèle ALM en lui fournissant les flux déterministes issus du modèle *Life Cash Flows*, mais également la provision mathématique et les intérêts techniques qui ont été déterminés dans la section précédente. Le modèle ALM revalorise ensuite les flux et la provision mathématique via une méthode de *flexing*. Pour cela :

- Les flux de trésorerie du passif sans PB sont utilisés pour calculer le résultat technique dans le compte de résultat pour la participation aux bénéfices.
- Les résultats financiers sont déterminés à l'intérieur du modèle ALM et sont utilisés pour calculer le compte de résultat pour la participation aux bénéfices.
- Les données du compte de résultat sont utilisées pour calculer le taux de participation aux bénéfices pour les flux de trésorerie du passif.

Cette méthode s'adresse aux compagnies qui calculent déjà la participation aux bénéfices à l'aide d'un modèle ALM, et aux produits dont la participation aux bénéfices dépend du résultat financier de l'assureur.

FIGURE 34 – Architecture de la PB via le *flexing*

5.4 Les scénarios de chocs

Les modèles qui utiliseront la bibliothèque *Life Cash Flows* nécessitent parfois de disposer de flux de trésorerie modélisés dans le cadre de différents scénarios de chocs. Cela concerne par exemple le pilier 1 de S2. La prise en compte de ces scénarios se fait à travers un sur-modèle qui effectue des lançements de la bibliothèque en faisant varier les hypothèses afin de correspondre aux différents scénarios souhaités. Le sur-modèle compilera ensuite les résultats obtenus et alimentera d'autres modèles, notamment un modèle de prévoyance santé ainsi qu'un modèle d'épargne-retraite utilisant le modèle ALM.

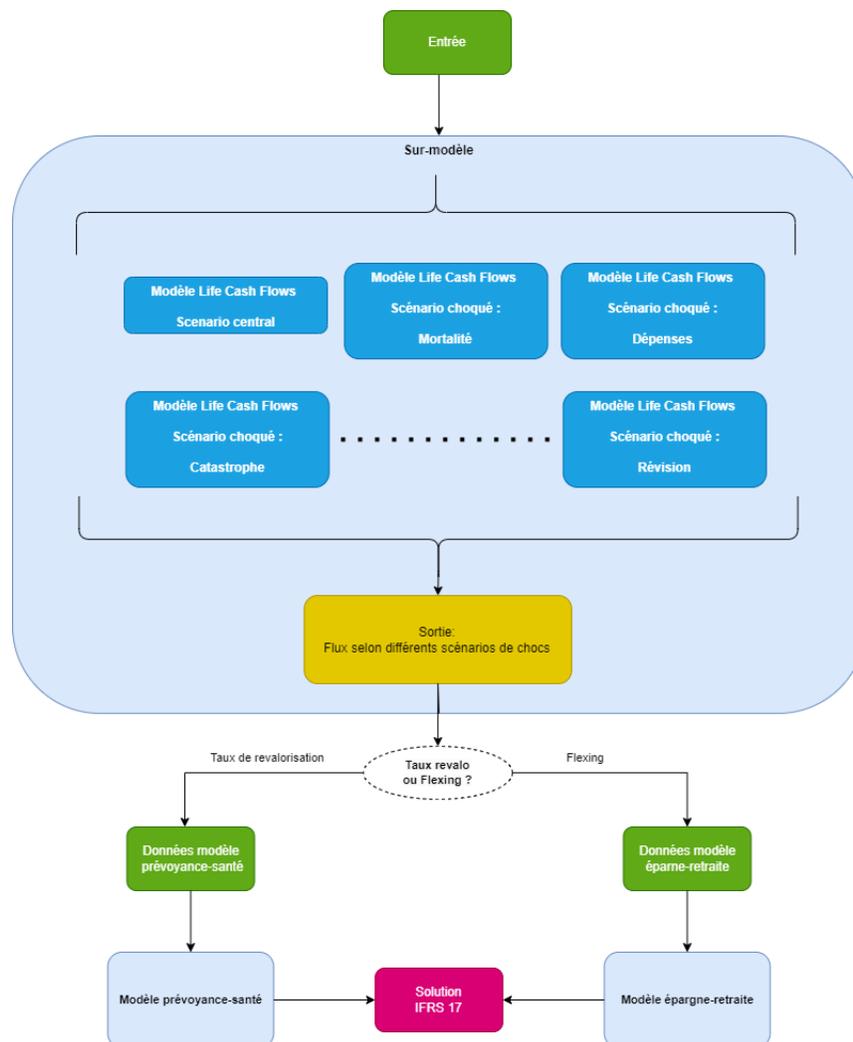


FIGURE 35 – Sur-modèle de génération des scénarios choqués

5.5 Test de fuite

Afin de contrôler le bon fonctionnement du modèle ALM lors de son alimentation par le modèle *Life Cash Flows*, il est possible d'utiliser un processus de recette classique des modèles ALM : le test de fuite.

Dans le cadre d'une projection risque neutre, les actifs évoluent, en moyenne, au taux sans risque. Ainsi, l'évolution de la valeur de marché de l'actif doit suivre le taux sans risque et les entrées et sorties de flux de trésorerie. C'est à dire :

$$VM_{t+1} = VM_t(1 + r_t) - \widehat{CF}_t$$

où :

- VM_t est la valeur de marché de l'actif en t
- r_t est le taux sans risque en t
- \widehat{CF}_t est la somme algébrique de tous les flux tombant au pas t (les flux positifs étant ceux sortant)

En isolant la valeur de marché en zéro, on obtient par récurrence qu'au dernier pas de projection H :

$$VM_0 = \frac{VM_H}{\prod_{k=0}^{H-1} (1 + r_k)} + \sum_{k=1}^H \frac{\widehat{CF}_k}{\prod_{i=0}^{k-1} (1 + r_i)}$$

Le test de fuite consiste à s'assurer que cette égalité est respectée. Cela permet de vérifier la cohérence entre la projection du passif et l'évolution de l'actif en contrôlant qu'aucun flux n'est créé ni manquant. La fuite est définie :

$$Fuite = [VM_0] - \left[\frac{VM_H}{\prod_{k=0}^{H-1} (1 + r_k)} + \sum_{k=1}^H \frac{\widehat{CF}_k}{\prod_{i=0}^{k-1} (1 + r_i)} \right]$$

Dans le cadre d'un lancement stochastique, un certain montant de fuite est naturel : l'évolution de l'actif au taux sans risque se fait "en moyenne". Il s'agit alors de calculer un taux de fuite : $\tau = \frac{Fuite}{VM_0}$ et de déterminer un seuil à partir duquel il sera jugé que le modèle comporte des erreurs dans son implémentation ou ses fichiers d'entrée.

Le test de fuite du modèle ALM permet notamment de repérer des problèmes sur les scénarios économiques, ce qui nous servira en section 9 lorsque nous étudieront une méthode visant à construire des jeux réduits de scénarios. A titre de référence, la fuite du modèle ALM utilisé est nulle (moins d'un centime) en scénario déterministe et inférieur à 0,2% en stochastique.

6 Le modèle *LCF* au sein de la solution IFRS 17

La solution IFRS 17 d'addactis est un modèle qui produit tous les éléments quantitatifs requis par la norme IFRS 17. Elle peut fonctionner soit à partir de flux externes directement fournis : la solution procède alors à la détermination des groupes de contrats et au calcul de la *Present Value*, ainsi que de tous les indicateurs nécessaires, soit à partir de données complètes sur les contrats : la solution génère alors l'ensemble des flux avant de les joindre avec le premier type et de continuer les calculs.

Naturellement, dans le cadre de la bibliothèque *Life Cash Flows*, c'est le premier type de fonctionnement qui sera utilisé. Néanmoins, cette alimentation nécessite normalement de fournir également des *coverage units* et *Risk Adjustment* externe. La bibliothèque pouvant calculer les *coverage units* mais pas le *RA*, une adaptation de la solution sera faite pour qu'elle puisse calculer les *RA* dans le cadre de flux externes.

6.1 Alimentation de la solution IFRS 17

L'alimentation de la solution IFRS 17 par le modèle *Life Cash Flows* passe par la segmentation des contrats et des flux de trésorerie. En effet, la solution nécessite d'une part de séparer les nouveaux contrats de ceux déjà existant lors du précédent reporting, et d'autre part de catégoriser tous les flux selon un type défini, notamment :

- Les primes
- Les prestations
- Les frais d'acquisition
- Les frais en cours de police
- La participation aux bénéfices

La bibliothèque effectuant des calculs à une maille très fine, cela se fait simplement en agrégeant les flux de manière conforme. Seule la participation aux bénéfices n'est pas directement calculée : celle-ci est modélisée au sein du modèle ALM une fois que ce dernier est alimenté par la bibliothèque. Pour chaque police, le modèle ALM détermine la participation aux bénéfices puis la ventile le long des types de flux en proportion du poids que représente chaque flux dans le flux total de la police.

L'alimentation de la solution IFRS 17 peut donc se faire selon deux modalités. Si une valorisation stochastique ou dépendante de l'actif est nécessaire, la bibliothèque *Life Cash Flows* alimente d'abord le modèle ALM qui effectue cette partie des calculs avant de transmettre à son tour les résultats à la solution IFRS

17. Dans le cas contraire, la bibliothèque peut directement alimenter la solution IFRS 17.

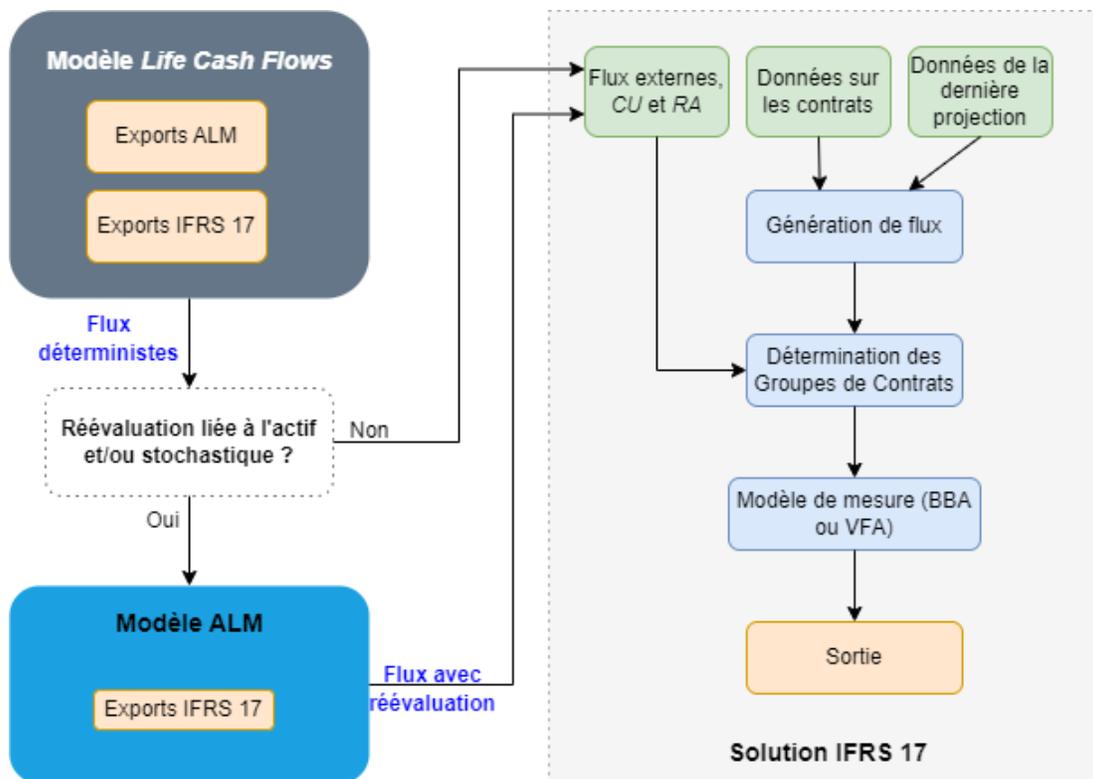


FIGURE 36 – Alimentation de la solution IFRS 17 par la bibliothèque *Life Cash Flows*

6.2 Le *Risk Adjustment*

La notion de probabilité se rattachant aux contrats d'assurance et aux flux de trésorerie est fondamentale : l'assureur est constamment confronté à de l'incertitude quant aux montants et occurrences des sommes qu'il perçoit ou verse. L'ajustement pour risque (*RA* : *risk adjustment*) vient matérialiser la compensation financière liée au risque généré par cette incertitude, c'est à dire qu'il représente la rémunération qu'exigerait un assureur pour prendre en charge ce risque. Plus précisément, le *RA* ne matérialise que le risque non-financier qui découle des contrats d'assurance.

6.2.1 Les risques sous IFRS 17

La norme IFRS17 scinde les risques en trois catégories : les risque financiers, les risques non-financiers et les risques ne découlant pas des contrats d'assurance.

Le risque financier

Il s'agit du risque lié à la variation possible de variables financières ou de variables non-financières non-spécifiques à l'une des parties du contrat. Il est pris en compte dans les estimations de flux de trésorerie futurs et dans le taux d'actualisation utilisé pour ajuster les flux de trésorerie.

Quelques variables financières :

- Taux d'intérêt
- Prix d'un instrument financier
- Prix d'une marchandise
- Taux de change
- Indice de prix ou de taux
- Notation ou indice de crédit

Quelques variables non-financières non spécifiques à l'une des parties :

- Indice de températures.
- Indice de pertes subies suite à un tremblement de terre.

Le risque non-financier

Le risque non-financier est celui concerné par le RA. Il correspond aux autres risques découlant des contrats d'assurances et se scinde en deux sous-catégories : les risques assurantiels, définies comme les risques transférés de l'assuré à l'assureur, et les autres risques, regroupant ceux restant.

Quelques risques assurantiels :

- Mortalité, Longévité
- Maladie
- Defaut
- Incendie

Quelques risques non assurantiels découlant de contrats d'assurance :

- Le risque de maintien ou déchéance : il s'agit du risque que le titulaire de police résilie le contrat à une date différente de celle à laquelle l'émetteur s'attendait lors de l'établissement du prix du contrat.
- Le risque de charge : il s'agit du risque d'augmentations inattendues des frais administratifs afférents à la gestion du contrat.

Les risques ne découlant pas des contrats d'assurance

Cela inclut notamment le risque opérationnel qui est un risque plus globale au niveau de l'entreprise.

L'ajustement au titre du risque non financier

Le paragraphe B87 donne une définition concrète du *Risk Adjustment* :

L'ajustement au titre du risque non financier découlant des contrats d'assurance correspond à l'indemnité qu'exigerait l'entité pour qu'il lui soit indifférent de choisir entre les deux éléments suivants :

- L'acquittement d'un passif qui est associé à un éventail de résultats possibles découlant du risque non financier.
- L'acquittement d'un passif qui générera des flux de trésorerie fixes dont la valeur actuelle attendue est la même que celle des contrats d'assurance.

Il ressort de cette notion deux aspects importants :

- IFRS 17 ne donne pas de liste exhaustive des risque s'appliquant au *RA*. Néanmoins, la norme Solvabilité 2 a défini une liste précise de risques qui peut fortement influencer les assureurs lors de leur cartographie des risques pour le *RA*.
- IFRS17 ne s'étend pas sur la notion d'aversion au risque, laissant ainsi une certaine marge d'interprétation.

6.2.2 Propriétés qualitatives du *Risk Adjustment*

La norme laisse une grande liberté à l'estimation du l'ajustement au titre du risque non financier. Elle ne fait qu'énoncer des principes que celui-ci doit respecter afin de présenter une cohérence vis à vis de ce qu'il représente : une compensation du fait de porter une incertitude pour une entreprise averse au risque. Ces cinq principes sont énoncé dans le B91 :

IFRS 17 n'impose pas de méthode d'estimation du RA. Toutefois, celui-ci doit présenter les caractéristiques suivantes :

1. Il sera d'un montant plus élevé si les risques sont peu fréquents mais graves que s'ils sont fréquents mais peu graves.
2. Pour des risques similaires, il sera d'un montant plus élevé si les contrats sont de longue durée que s'ils sont de courte durée.
3. Il sera d'un montant plus élevé si la distribution des probabilités des risques est large que si elle est étroite.
4. Il sera d'un montant d'autant plus élevé que l'estimation à jour et la tendance qu'elle présente comportent de nombreuses inconnues.
5. Il sera d'un montant d'autant moins élevé que les statistiques récentes réduisent l'incertitude entourant le montant et l'échéancier des flux de trésorerie, et vice-versa.

6.2.3 Lien avec S2

Dans IFRS 17, la notion d'ajustement pour risque est sensiblement proche de la notion Solvabilité 2 de marge pour risque. Néanmoins, si la modélisation du *Risk Adjustment* peut être largement inspirée de cette dernière, les nombreux écarts méthodologiques découlant des différences entre les deux normes est source de différence significatives, y compris lorsque la méthode appliquée est identique. Le tableau suivant résume les principales différences :

Sujet	Marge de risque	<i>Risk Adjustment</i>
Principe de la notion	Compensation financière pour la récupération d'un risque	Compensation financière pour la récupération d'un risque
Modélisation	Méthode du coût du capital	Méthode libre mais obligation de fournir un niveau de confiance équivalent
Granularité	Ligne d'activité	Portefeuille x Génération x Rentabilité
Périmètre des risques	Risques explicitement définies dans S2	Risques non-financiers associés aux contrats d'assurance
Choix des paramètres	Valeur du coût du capital imposée : 6% Courbe de taux d'actualisation imposée Scénarios choqués pour le SCR imposés	Choix des paramètres libre
Type de projection	Run-off	Run-off ou continuité d'exploitation

6.3 Modélisation du *Risk Adjustment*

La liberté laissée par la norme sur l'ajustement au titre du risque non financier implique de nombreuses possibilités de modélisation. Il convient à l'assureur de retenir celle qu'il juge la plus pertinente en fonction de son risque et de ses moyens de modélisation.

Il existe deux grand types d'approches : celles qui définissent des scénarios extrêmes servant de proxy pour déterminer si le *Risk Adjustment* permet de couvrir la compagnie avec une probabilité suffisante, et celles qui étudient directement cette probabilité. La première méthode présentée est de ce second type, les deux suivante du premier.

6.3.1 Méthodes par mesure de risque

Il s'agit de méthodes par niveau de confiance qui se basent directement sur la distribution de probabilité sous-jacente au *Best Estimate*. Le concept est de générer des scénarios économiques de manière stochastique puis de projeter le passif pour chacun de ces scénarios. Ainsi, on obtient une chronique des flux de trésorerie futur selon chaque scénario ce qui permet d'obtenir, non seulement un *BE*, c'est à dire la moyenne de ces flux, mais aussi la totalité de la courbe de distribution des flux et en particulier chaque quantile.

Ainsi, pour chaque risque r , une fois que la distribution du BE_r (variable aléatoire) est connue, on obtient un *BE* central par l'espérance des *BE* simulés selon les scénarios :

$$BE_r^{central} = \mathbb{E}[BE]$$

On choisit par ailleurs une mesure de risque ρ qui permet de définir le *Risk Adjustment* ainsi :

$$RA_r = \rho(BE_r) - \mathbb{E}[BE]$$



FIGURE 37 – Modélisation du *RA* par mesure de risque

La mesure de risque retenue est généralement la *Value at Risk* ou *Tail Value at Risk* à un certain seuil de confiance.

Value at Risk

Pour une variable aléatoire X , par exemple le montant d'une perte financière à un horizon donné, la *Value at Risk* au seuil de confiance α correspond à la valeur qui a une probabilité α de ne pas être dépassée. Plus précisément :

$$VaR_\alpha(X) := \inf(\{x \mid P(X > x) < 1 - \alpha\})$$

Il s'agit de la mesure de risque sous-jacente aux SCR de S2, où le seuil α est de 99.5% et l'horizon de 1 an. Concrètement, elle représente la perte engendrée par le plus probable des scénarios extrêmes.

Cette mesure de risque présente l'inconvénient d'être indépendante de l'allure de la courbe au delà du seuil fixé, ce qui la rend peu apte à tenir compte des

risques très extrêmes. De plus, elle n'est pas cohérente car non sous-additive : la diversification peut augmenter le risque.

Tail Value at Risk

Pour une variable aléatoire X , la *Tail Value at Risk* au seuil de confiance α correspond à l'espérance de cette variable sachant qu'elle dépasse la VaR de seuil α . C'est à dire :

$$TVaR_\alpha := \mathbb{E}[X | X > VaR_\alpha(X)]$$

Il s'agit de la mesure de risque sous-jacente au *Swiss Solvency Test*, la norme prudentielle appliquée en Suisse. Le seuil α y est de 99%. Concrètement, il s'agit de la perte moyenne engendrée lorsque occure un scénario extrême.

Cette mesure de risque présente l'avantage d'être cohérente et de mieux capter les risques extrêmes. Cependant, son calcul est plus complexe que celui de la VaR.

6.3.2 Méthode des chocs de BE

Il s'agit de s'inspirer de la construction du *SCR* sous Solvabilité 2. On commence par établir une cartographie des risques non financiers, puis pour chacun d'eux on définit un scénario central et un scénario choqué. A chaque scénario correspond un *Best Estimate*, et on obtient pour chaque risque un *Risk Adjustment* élémentaire comme la différence du *BE* choqué et central. Le *RA* global s'obtient en agrégeant les *RA* élémentaires via une matrice de corrélation afin de tenir compte de la non indépendance des risques (une simple somme correspondrait à une dépendance totale des risques). Ceci permet de bénéficier d'une réduction du *RA* grâce à la diversification des risques. Mathématiquement, cela se traduit ainsi :

Considérons n risques non-financiers.

Soit $RA = {}^t(RA_1, \dots, RA_n)$ le vecteur des *RA* pour les risques 1 à n

Soit $\Sigma = (\sigma_{i,j})_{i,j < n}$ la matrice de corrélation entre ces risques.

$\forall r$, risque non financier,

$$RA_r = BE_r^{choqué} - BE_r^{central}$$

$$RA_{global} = \sqrt{{}^t RA \cdot \Sigma \cdot RA} = \sqrt{\sum_{i,j < n} RA_i \cdot RA_j \cdot \sigma_{i,j}}$$

Bien qu'inspirée de S2, cette méthode doit être adaptée dans le cadre d'IFRS 17 puisque la norme, même si plus souple, pose des contraintes différentes. Ainsi :

- L'assureur doit établir une cartographie des risques cohérente avec le *RA*.
- L'horizon du risque : le SCR de S2 représente une vision à 1 an alors que le *RA* porte sur la durée entière de l'engagement.
- Le seuil de confiance sous-jacent est de 99.5% sous S2 mais libre sous IFRS17 pour s'adapter à l'aversion au risque des compagnies.
- La frontière et la granularité des contrats diffère entre les deux normes.
- Pour le scénario de choc, l'entité est libre de définir un autre scénario que celui de S2, et de juger s'il est conforme à son seuil de confiance sous-jacent.

Avantages :

- Justification relativement simple car s'appuyant sur une méthodologie reconnue : celle de S2.
- Capitalisation possible sur les calculs de S2.
- Application mieux maîtrisée car déjà largement appliquée dans le cadre de S2.
- Se calcul à un niveau global et tient compte de la mutualisation.

Inconvénients :

- Nécessite une charge supplémentaire pour adapter les calculs de S2.
- Ne s'agissant pas d'une méthode par niveau de confiance (contrairement à celles de la VaR ou TVaR), il est obligatoire de déterminer un niveau de confiance auquel correspond cette méthode.
- Nécessite de réaliser une cartographie des risques.

- Ne facilite pas la comparaison entre les acteurs car deux modèles de deux acteurs peuvent fortement diverger, notamment en cas d'utilisation de modèles internes pour les SCR.

6.3.3 Méthode du coût du capital

Cette méthode consiste à reprendre celle du calcul de la marge de risque de S2. L'article 77 paragraphe 3 de la directive S2 énonce ceci sur la marge de risque :

La marge de risque est calculée de manière à garantir que la valeur des provisions techniques est équivalente au montant que les entreprises d'assurance et de réassurance demanderaient pour reprendre et honorer les engagements d'assurance et de réassurance.

On y retrouve la notion rattachée au *RA* de compensation pour une récupération d'un risque d'assurance. Ainsi, on calcul le *RA* selon la formule suivante

$$RA = CoC \cdot \sum_{t \geq 0} \frac{SCR_t}{(1 + r_{t+1})^{t+1}}$$

avec :

- *CoC* le coût du capital
- SCR_t le montant du SCR au pas t
- r_t le taux du pas t

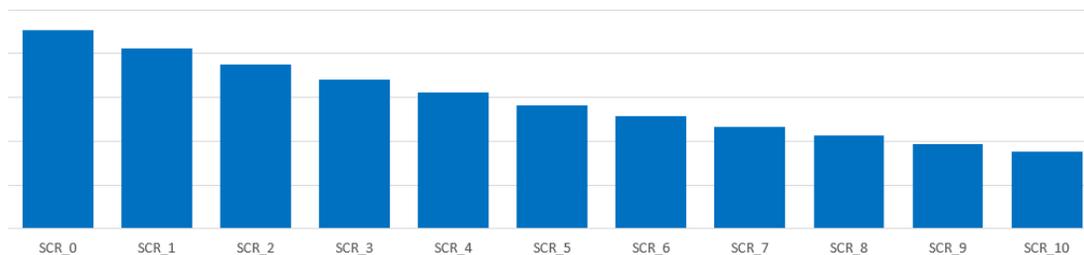


FIGURE 38 – SCR projeté et actualisé le long des années

Les adaptations, avantages et inconvénients sont similaires à ceux de la méthode précédentes. Concernant le coût du capital et les taux utilisés, l'assureur n'est également pas tenu de reprendre les valeurs imposées dans le cadre de S2. Néanmoins, il doit toujours être au mesure de justifier la pertinence de ses choix aux autorités de contrôle.

6.3.4 Conversion des SCR en *RA*

Très utilisée en ALM, la méthode par mesure de risque serait efficace dans le cadre de ce mémoire puisque la bibliothèque *Life Cash Flows* modélise des produits vie ce qui engendre un passif très dépendant de l'actif et non-linéaire en les courbes modélisées. Néanmoins, elle s'avèrerait lourde en calcul ce qui contreviendrait aux objectifs de simplicité et d'efficacité de la bibliothèque.

De plus, les deux méthodes précédentes, se basent sur un calcul de SCR et sont simples une fois ce SCR obtenu. Or, il existe des méthodes pour convertir des SCR solvabilité 2 en *Risk Adjustment*. Ceci permet une forte économie de calcul pour les entreprises calculant déjà des SCR, ce qui est le cas pour addactis qui dispose déjà d'un modèle calculant les SCR via le modèle ALM auquel se branche la bibliothèque.

Ces conversions sont détaillées dans le mémoire "*Risk Adjustment : Techniques d'évaluation et adaptation des calculs Solvabilité II*" de Tachfine El Alami. Nous en donnons ici une synthèse succincte :

Une fois la cartographie des risques réalisée, il s'agit, pour chaque risque r , de déterminer un coefficient d'ajustement Adj tel que :

$$RA_r = SCR_r \cdot Adj(\text{horizon}, \text{seuil}, \text{métrique}, \text{granularité}, \text{volume})$$

L'ajustement sert donc à modifier :

- L'horizon du risque : 1 an pour S2, la durée entière des engagements pour IFRS 17.
- Le seuil de confiance : 99.5% pour S2, dépendant de l'aversion au risque de l'entité pour IFRS 17.
- La métrique : les contrats à considérer peuvent différer entre les deux normes.
- La granularité : lignes d'activité pour S2 et groupe de contrats pour IFRS 17.
- Le volume de contrats : il peut différer dû aux deux points précédents.

La construction de l'ajustement se fait en deux étapes :

Première étape

On note Δ_r^{S2} et Δ_r^{IFRS} le choc pour le risque r sous la norme indiquée. La première étape consiste à construire, pour chaque risque, une fonction α_r permettant de passer du choc S2, de seuil de confiance 99.5% à un choc IFRS 17 de seuil de confiance dépendant de l'appétence au risque de l'entreprise :

$$\Delta_r^{IFRS} = \alpha_r(\Delta_r^{S2})$$

Seconde étape

On détermine une fonction ϕ_r dite de *scaling* qui permet de passer du choc IFRS 17 obtenu au coefficient d'ajustement qui multipliera le SCR. Cette fonction permet de prendre en compte le changement de l'horizon du risque et l'aspect volume des contrats dû à la frontière des contrats et la granularité de calcul :

$$RA_r = SCR_r \cdot \phi_r(\Delta_r^{IFRS})$$

Hypothèses sous-jacentes

Il est à noter que cette méthode nécessite de faire des hypothèses pour pouvoir quantifier les chocs. Par exemple, pour déterminer la fonction α_{long} du risque de longévité, on peut supposer que la mortalité évolue selon un modèle de Lee-Carter, c'est à dire avec une force de mortalité $\mu(x, t)$ à la date t pour un individu d'âge x qui est donnée par :

$$\begin{cases} \ln(\mu(x, t)) = (\alpha_x + \beta_x k_t) \\ k_t = k_0 + C \cdot t + \sigma \sum_{k=1}^t \epsilon_k \end{cases}$$

où :

- k est une série temporelle centrée en k_0 de tendance C et de volatilité σ ; $(\epsilon_k)_{k \in \mathbb{N}^*}$ étant une famille de lois normales indépendantes centrées réduites. k représente l'évolution de la mortalité au cours du temps.
- α_x représente une source de décès en fonction de l'âge fixe dans le temps.
- β_x représente une source de décès en fonction de l'âge et variant au cours du temps.

Une fois le modèle d'évolution de mortalité choisi, une formule en est déduite pour les chocs S2 et IFRS17 ce qui permet d'exprimer le second en fonction du premier. On obtient ainsi la fonction α :

$$\Delta_r^{IFRS} = \alpha_{long}(\Delta_r^{S2}) = \frac{q_\alpha}{q_{0.995}} \sqrt{t} \Delta_r^{S2}$$

Il en va ensuite de même pour la détermination de la fonction de *scaling phi_{long}* ainsi que pour les autres risques.

Calcul du SCR

Cette méthodologie permet donc une économie de temps en réutilisant les calculs S2 pour le *Risk Adjustment* d'IFRS 17. Par ailleurs, il est également intéressant de se pencher sur le calcul propre des SCR dans le cas de S2. En effet, ceux-ci restent particulièrement lourds dans le cas de l'assurance sur la vie puisqu'ils nécessitent de calculer des *Best Estimates* non seulement par scénarios économiques, mais également, pour chacun de ces scénarios, par chocs, démultipliant par conséquent le poids calculatoire de la modélisation stochastique. Pour améliorer cela, nous étudierons en section 9 une méthode proposée par l'eiopa, appelée *Prudent Harmonized Set of Scenarios* qui vise à réduire considérablement le nombre de scénarios économiques à utiliser pour l'évaluation de la *TVOG* dans le *Best Estimate*.

IV

Optimisation de performances

7 Répondre à une contrainte de performance : le cadre de distribution

L'objectif du modèle *Life Cash Flows* est de fournir un cadre de modélisation à la fois plus simple et plus efficient. Il est en amont de plusieurs modèles pouvant être lourds d'un point de vue calculatoire, comme cela a été vu avec le modèle ALM qui peut nécessiter des calculs stochastiques, ou avec la solution IFRS 17 pour la modélisation du *Risk Adjustment*. Ainsi, la performance propre du modèle *Life Cash Flows* en termes de temps de calcul est cruciale.

Cette section présente le développement, au sein de la bibliothèque, d'une architecture parallèle, appelée le cadre de distribution, capable de modéliser simultanément les différentes lignes des portefeuilles, et conduisant donc à une réduction considérable des temps d'exécution et de mémoire vive utilisée.

7.1 Le parallélisme

En informatique, le parallélisme désigne la technique qui consiste à traiter les données de manière simultanée, en parallèle. Cette approche s'oppose au séquençement classique où les opérations sont exécutées les unes après les autres. Le parallélisme permet d'améliorer l'efficacité et la vitesse de traitement des systèmes informatiques.

7.1.1 Architecture

L'architecture des ordinateurs est un point clef du parallélisme. Plusieurs éléments interviennent dans la capacité à effectuer des tâches simultanément :

- **Le processeur** : C'est le cerveau de l'ordinateur : il est responsable de l'exécution des instructions et du traitement des données. Dans un système multiprocesseur, chaque processeur peut exécuter des tâches indépendamment des autres. Plus il y a de processeurs, plus il est possible de traiter simultanément des instructions ou tâches différentes.
- **Les cœurs** : Aujourd'hui, les processeurs sont multi-cœurs : ils disposent de plusieurs unités de traitement, les cœurs, dont chacune peut exécuter des tâches indépendamment des autres. Plus il y a de cœurs, plus le processeur est capable de gérer efficacement plusieurs *threads* simultanément, ce qui est particulièrement bénéfique pour les applications parallélisées.

- **Le *thread*** : Il représente la plus petite séquence d'instructions programmées que peut gérer un système d'exploitation. En pratique, un cœur peut souvent exécuter plusieurs *threads* simultanément ce qui lui permet d'améliorer l'utilisation des ressources du processeur.
- **Le processeur logique** : Cela fait référence à un cœur capable de gérer plusieurs *threads* simultanément : le système d'exploitation voit chaque cœur comme plusieurs processeurs logiques même s'il n'y a physiquement qu'un seul cœur. Cela peut améliorer les performances pour certaines tâches parallélisables, car il permet une gestion plus efficace de l'exécution des instructions.

Pour la parallélisation, le nombre de processeurs logiques est un facteur clé. Néanmoins, l'architecture physique reste importante, et l'efficacité du parallélisme dépend fortement de la manière dont les applications sont conçues pour exploiter ces éléments, ainsi que de la gestion de ces ressources par le système d'exploitation. La limite à la parallélisation peut donc s'avérer tant matérielle que logique.

7.1.2 Fonctionnement du parallélisme

Le parallélisme peut se faire de deux manières : au niveau des données, où celles-ci sont divisées en segments qui peuvent être traités simultanément, et au niveau des instructions : où plusieurs processus sont exécutés en parallèle, effectuant une partie du travail global, permettant ainsi une exécution plus rapide.

La taxonomie de Flynn, de l'informaticien Michael J. Flynn, définit de manière schématique et simplifiée quatre classes d'architecture d'ordinateur :

- ***Single Instruction, Single Data (SISD)*** : Il s'agit des ordinateurs séquentiels sans parallélisme qui traitent les données et les instructions de manière linéaire.
- ***Single Instruction, Multiple Data (SIMD)*** : Ce sont les systèmes qui utilisent uniquement le parallélisme de données. Ils sont utiles pour traiter de grandes quantités de données de manière uniforme avec une seule instruction.
- ***Multiple Instructions, Single Data (MISD)*** : Peu utilisés, ils correspondent à des systèmes traitant en parallèle une unique donnée.
- ***Multiple Instructions, Multiple Data (MIMD)*** : Il s'agit de l'ar-

chitecture pleinement parallèle et la plus courante. Les unités de calcul traitent des données différentes avec des instructions différentes. La mémoire peut alors être partagée, ce qui nécessite une gestion de son accès par les processus, ou distribuée, ce qui nécessite un système de communication entre elles.

<i>Instructions</i>	Uniques	Multiples
<i>Données</i>	Uniques	Uniques
	SISD	MISD
	Multiples	Multiples
	SIMD	MIMD

TABLE 3 – Taxonomie de Flynn

7.1.3 Efficacité théorique

En première approche, la réduction du temps d'exécution possible par le parallélisme peut être arbitrairement grande pourvu que l'on dispose de suffisamment d'unités de calcul. Néanmoins cette réduction ne s'applique qu'à la portion parallélisable des programmes, or ces derniers ont nécessairement ou presque des parties séquentielles, ce qui minore fondamentalement le temps d'exécution.

Le gain de vitesse dû à la parallélisation est donné de manière simplifiée par la loi d'Amdahl. Celle-ci exprime l'accélération théorique d'un programme, c'est à dire le facteur de réduction de temps d'exécution entre la version séquentielle et parallélisée, en fonction de sa proportion parallélisable et du nombre de processeurs utilisés :

Soit p la proportion du programme parallélisable et n le nombre de processeurs. On note $T_p(n)$ le temps d'exécution du programme et $t := T_p(1)$ son temps d'exécution en purement séquentiel. On a :

$$t = pt + (1 - p)t$$

Or, puisque l'utilisation de n processeurs permet de diviser le temps d'exécution de la portion parallèle par n , on a :

$$T_p(n) = p \frac{t}{n} + (1 - p)t$$

Ce qui donne l'accélération théorique :

$$S_p(n) = \frac{T_p(n)}{t} = \frac{1}{1 - p + \frac{p}{n}}$$

De plus, l'accélération théorique maximale est alors bornée et dépend de la proportion du programme qui est parallélisable :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_p(n) = \frac{1}{1 - p}$$

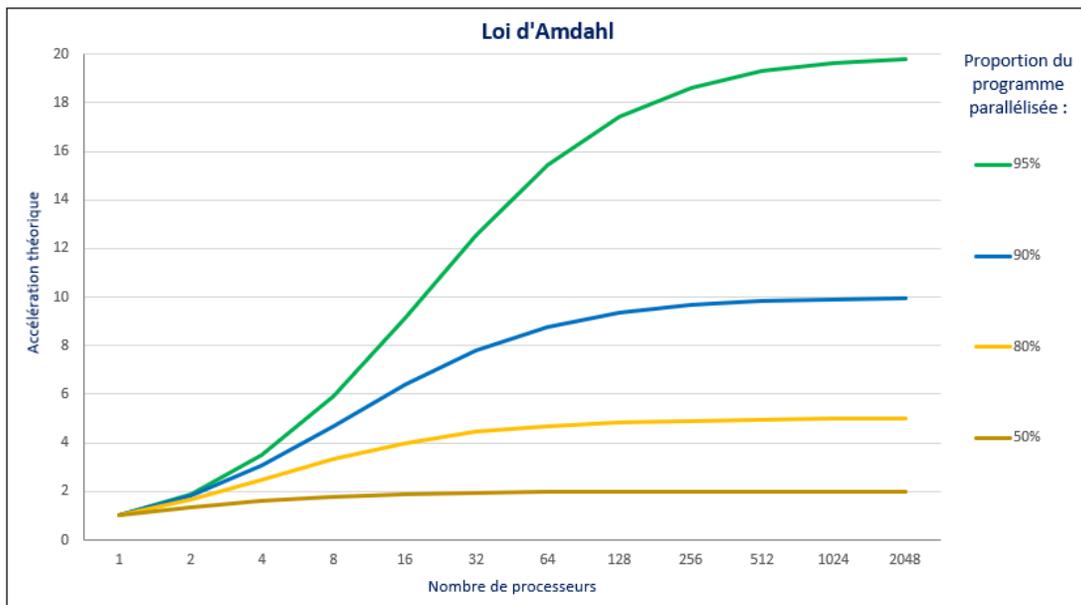


FIGURE 39 – Loi d'Amdahl

La loi d'Amdahl illustre ainsi que le gain vitesse d'un programme dû à la parallélisation est fondamentalement limité par sa portion séquentielle, le plafond étant l'inverse de la proportion séquentielle.

Une seconde limitation est propre à la partie parallèle du programme : l'*overhead*. Ce terme désigne les coûts additionnels en termes de temps et de ressources qui ne contribuent pas directement à l'exécution des calculs du programme. En effet, la création et la gestion des processus impliquent des coûts pour leur démarrage, leur ordonnancement et leur terminaison. Ces opérations sont essentielles mais ne participent pas au calcul proprement dit. Or, le temps gagné grâce à chaque nouveau processeur étant décroissant, il existe une limite à partir de laquelle il ne compense plus le ralentissement provoqué par l'*overhead*.

Cette conséquence inhérente à la gestion du parallélisme peut influencer significativement son efficacité globale. Néanmoins, en pratique, cette limite arrive surtout lorsque le temps de calcul a déjà été fortement réduit et que le nombre de processeurs utilisés est très grand.

7.2 Parallélisme dans la bibliothèque *Life Cash Flows*

Dans certaines circonstances, le parallélisme offre des diminutions remarquables du temps de calcul, et cela sans contrepartie. Par conséquent, son déploiement dans le développement de la bibliothèque s'aligne parfaitement avec les objectifs de performance visés.

7.2.1 L'indépendance des lignes

Les modèles actuariels de type ALM ou assurance-vie ont généralement besoin de faire des évaluations stochastiques de leur passif. Le parallélisme s'avère donc une structure naturelle puisque les simulations sont par nature indépendantes, comme c'est le cas dans le modèle ALM utilisé. Les différentes simulations sont scindées en autant de groupes que de processeurs disponibles, ce qui permet d'accélérer les calculs des parties concernées. Or, ces parties sont les plus calculatoires de par le nombre de simulations élevé (au moins mille, en général).

Or, en pratique, on constate qu'outre les simulations, les lignes au sein des portefeuilles de passif sont généralement indépendantes, ou a minima indépendantes par groupe : il s'agit par exemple des groupes de contrats dans IFRS 17, ou de chaque ligne dans le modèle *Life Cash Flows*. Notons que dans le cas d'assurance sur plusieurs têtes, le parallélisme n'est aucunement pénalisé puisque les groupes de têtes interdépendants ne se limitent qu'au plus à quelques lignes, tandis qu'une parallélisation optimale effectue des groupements de lignes bien plus grands.

Il est donc possible d'utiliser cette indépendance pour paralléliser le modèle *Life Cash Flows* et obtenir améliorer ses performances en conséquence.

7.2.2 Le cadre de distribution

Le cadre de distribution est l'outil via lequel le parallélisme est développé au sein du modèle. Tout en amont, le modèle sélectionne chaque portefeuille de produit qu'il scinde en de plus petits portefeuilles en faisant un regroupement selon une colonne clef, comme le numéro de la ligne ou du *GoC*. Les différents groupes sont appelés distributions et sont entièrement indépendants. Les tables dépendant du portefeuille sont alors segmentées de la même manière grâce à la colonne clef

qu'elles ont en commun. La parallélisation peut ensuite se faire naturellement puisque les tables de chaque distribution n'ont aucune interaction entre elles, jusqu'à leur regroupement lors des exports ou de la synthèse des flux.

Cela offre un excellent gain de performance sans aucune contrepartie en termes de maintenance ou de lisibilité. Cela réduit également la mémoire utilisée, permettant au modèle de tourner avec de plus gros portefeuilles sur des ordinateurs moins puissants, ce qui est idéal pour les entreprises qui disposent de moyens limités.

Notons que cette implémentation serait difficile sur un modèle ALM, par exemple à cause de l'algorithme de calcul de la participation au bénéfice qui entraîne une certaine dépendance entre les lignes. Cependant, la mise en place d'un cadre de distribution ne serait pas pertinente car, le modèle étant stochastique, il utilise un cadre de simulation qui exploite déjà au maximum les capacités du parallélisme.

7.2.3 Proportion du modèle LCF parallélisable

Qualitativement parlant, on remarque qu'une très grande partie de la bibliothèque peut bénéficier de la parallélisation. En effet :

- Les modules d'agrégation et d'export regroupent toutes les lignes donc leurs calculs ne sont pas parallélisables.
- Le module du coefficient d'ajustement effectue en partie des calculs sur l'ensemble des lignes donc n'est pas entièrement parallélisable.
- A l'exception des modules précédents, les modules produits utilisent uniquement des sous-modules dont les calculs sont sur des lignes sans aucune interaction entre elles.
- La majorité des calculs est concentrée sur ces modules produits.

Il est possible de connaître le temps d'exécution du modèle hors compilation et écriture du fichier de résultat qui sont des temps dépendants peu de la taille du portefeuille. Ainsi, lorsque l'on effectue un lancement du modèle sans cadre de distribution et que l'on regarde les poids des différents éléments du modèle, on constate que 84% du temps de calcul est utilisé par des éléments intégrés au cadre de distribution.

De plus, la loi d'Amdahl permet d'extrapoler la proportion parallélisable p :

- On commence par évaluer les temps d'exécution du modèle parallélisé en fonction du nombre de processeurs utilisés.
- Puis on détermine le p qui minimise l'erreur avec la loi d'Amdahl appliquée en les points mesurés.

Le graphique ci-dessous représente la comparaison entre l'accélération mesurée en fonction du nombre de processeurs, 1 à 8, utilisés par le modèle, et l'accélération théorique qu'il devrait y avoir si la proportion parallélisée était de 83,3%, soit celle qui minimise l'écart avec la mesure.

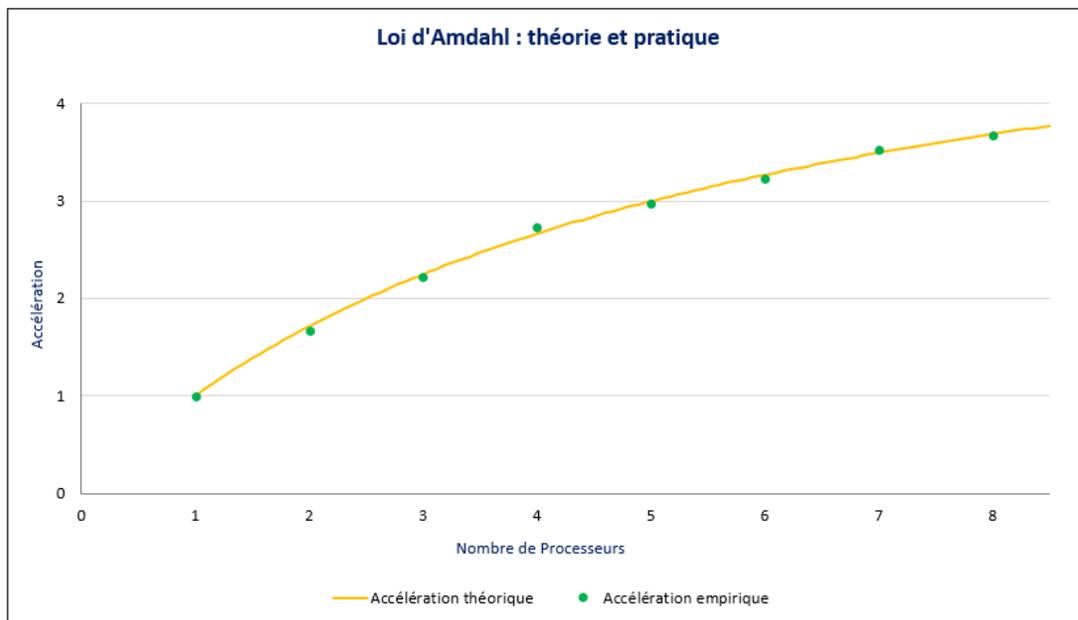


FIGURE 40 – Loi d'Amdahl en théorie et en pratique ($p=83,3\%$)

Empiriquement, la proportion parallèle du modèle est évaluée par la loi d'Amdahl à $p = 83,3\%$ contre 84% en théorie. De plus, il montre qu'il n'y a pas d'*overhead* significatif causé par la parallélisation.

Enfin, on constate que l'accélération atteinte est de 3,8, ce qui est une réduction considérable du temps de calcul du modèle.

7.3 Objectif de performances et mesure de performances

Bien que probants, ces résultats sont à mettre en perspective avec les objectifs de performances de la bibliothèque. En effet, dans un contexte où les temps de d'exécution peuvent être un enjeu majeur pour des compagnies face à leur devoir de communication envers leurs autorités de contrôle, il est primordial d'avoir les meilleurs performances possibles. Ainsi, la bibliothèque s'est vu définir des objectifs de temps d'exécution et de mémoire vive utilisée. L'intérêt de la réduction de mémoire vive utilisée est de permettre une exécution du modèle avec un grand nombre de lignes, d'une part sans nécessiter d'ordinateurs particulièrement performants, et d'autre part sans paralyser les ordinateurs le temps de l'exécution du modèle.

Le tableau suivant illustre, pour la temporaire décès, les objectifs de performances du modèle, ainsi que ses performances avant et après l'implémentation du cadre de distribution. :

		Temps d'exécution			Pic de RAM (GO)		
Projection	Nombre de polices	Objectif	Sans cadre de distribution	Avec cadre de distribution	Objectif	Sans cadre de distribution	Avec cadre de distribution
Mensuelle sur 100 ans	1 000	1min	44s	14s	32	0,5	0,2
	10 000	7min	7min04	1min51	32	4,2	1,1
	100 000	20min	Echec	14min45	32	Echec	6,8

FIGURE 41 – Efficacité du cadre de distribution sur le modèle *Life Cash Flows*

Les résultats obtenus sont probants : pour les gros portefeuilles, les temps de calculs, hors compilation et écriture de fichier, ont été divisé par 3,8 ce qui permet respecter l'objectif fixé. Néanmoins, bien que concluant, il est toujours possible d'améliorer les performances à travers d'autres méthodes, que nous explorons dans les deux prochaines sections.

8 Mensualisation de flux de trésorerie annuels

Il est parfois important d'avoir des projections à pas mensuel. Or, combiné aux horizons de projections éloignés nécessaires à la modélisation des produits d'assurance sur la vie, cela pose un réel problème de performance. Cette section consiste à déterminer une méthodologie pour approcher les résultats d'un lancement à pas mensuel du modèle mais en effectuant un lancement à pas annuel.

Nous disposons de flux de trésorerie (probabilisés, non actualisés) annuels représentant des versements annuels de rentes. L'objectif est de déterminer des flux de trésorerie annuels équivalents lorsque les rentes sont versées en fraction d'année : m versements par an. Nous traitons uniquement les versement de rentes : les autres flux (primes, frais, etc.) s'obtiennent de manière similaire. On considère dans la suite le cas particulier du mois : $m = 12$

8.1 Interpolation des tables de mortalité

Nous disposons d'une table de mortalité fournissant, pour chaque âge n entier, le nombre d'individus l_n ayant survécu à l'âge n . Nous considérons un individu d'âge $x = n + t$, où $n \in \mathbb{N}$ et $t \in [0, 1]$. Nous cherchons à adapter la table de mortalité pour cet individu à l'âge non entier. Pour cela nous procédons à une interpolation de la table de mortalité. Ceci nécessite de faire une hypothèse sur la distribution de la mortalité entre deux âges entiers. Généralement, l'hypothèse est l'une des trois suivantes :

8.1.1 Hypothèse linéaire : Distribution uniforme des décès

Il s'agit de supposer que les décès des individus ayant survécu à l'âge n mais pas à l'âge $n + 1$ sont survenus de manière homogène au cours de l'année, i.e. que la fonction des l_x est linéaire entre deux valeurs connues. Cela a pour conséquence que pour tout âge $n + t$, où $n \in \mathbb{N}$ et $t \in [0, 1]$, l_{n+t} s'obtient par

$$l_{n+t} = (1 - t)l_n + tl_{n+1}$$

On en déduit la probabilité de survivre au pas de longueur s suivant pour un individu quelconque d'âge $n + t$:

$${}_s p_{n+t} = \frac{l_{n+t+s}}{l_{n+t}} = \frac{(1 - t - s)l_n + (t + s)l_{n+1}}{(1 - t)l_n + tl_{n+1}}$$

Cette hypothèse a l'avantage d'être simple mais engendre une interpolation qui épouse assez mal la courbe dans son ensemble (les interpolations sont des droites alors que la courbe globale n'en est pas une).

8.1.2 Hypothèse exponentielle : Force de mortalité constante

La force de mortalité μ est mathématiquement définie comme la probabilité instantanée de décès par âge conditionnellement à la survie, c'est-à-dire :

$$\forall x \in \mathbb{R}, \mu(x) = \frac{f(x)}{S(x)}$$

Où f est la densité de la loi de la durée de vie et $S(x)$ est la probabilité de survivre à l'âge x .

Concrètement, sur de courtes périodes la probabilité de mourir est proportionnelle à la durée de cette période. La force de mortalité est le facteur de proportionnalité correspondant.

Comme $f = -\frac{dS}{dx}$, on a :

$$\mu(x) = \frac{f(x)}{S(x)} = \frac{-S'(x)}{S(x)} = -\frac{d}{dx} \ln(S(x))$$

puis en intégrant et en appliquant le théorème fondamental de l'analyse :

$$\int_0^x \mu(t) dt = \int_0^x -\frac{d}{dt} \ln(S(t)) dt = -\ln(S(x))$$

Ce qui donne :

$$S(x) = e^{-\int_0^x \mu(t) dt}$$

La seconde hypothèse d'interpolation des tables de mortalité est celle de force de mortalité constante entre deux âges entier. Concrètement, cela revient à supposer que la probabilité instantanée de mourir ne dépend que de la partie entière de l'âge, i.e. elle est constante par morceaux.

De cette hypothèse $\mu_x = \mu \in \mathbb{R}^+$, on obtient que $\forall n \in \mathbb{N}, \forall t \in [0, 1]$,

$$S(n+t) = e^{\mu(n+t)} = e^{\mu n} e^{\mu t} = S(n)(e^{\mu})^t = S(n) \left(\frac{e^{\mu(n+1)}}{e^{\mu n}} \right)^t = S(n) \frac{S(n+1)}{S(n)}$$

Or, $\forall x \in \mathbb{R}^+, S(x) = \frac{L_x}{L_0}$ donc en divisant par L_0 :

$$l_{n+t} = l_n \left(\frac{l_{n+1}}{l_n} \right)^t$$

On en déduit la probabilité de survivre à l'année pour un individu d'âge quelconque :

$${}_s p_{n+t} = \frac{l_{n+t+s}}{l_{n+t}} = \left(\frac{l_{n+1}}{l_n} \right)^s = p_n^s$$

On remarque que le résultat ne dépend en effet pas de t qui est la partie non entière de l'âge de l'individu

8.1.3 Hypothèse hyperbolique : l'hypothèse de Balducci

Cette hypothèse consiste à supposer que la probabilité de décès d'un individu avant l'atteinte de l'âge entier suivant est proportionnelle au temps restant avant l'atteinte de cet âge, i.e. :

$${}_{1-t}q_{n+t} = (1-t)q_n$$

$$l_{n+t} = l_x \cdot tq_n$$

Cette hypothèse consiste à supposer un taux de mortalité hyperbolique

$${}_tq_n = \frac{t \cdot q_n}{1 - (1-t)q_n}$$

Notons que cette hypothèse mène à une force de mortalité décroissante :

$$\mu_{n+t} = \frac{q_n}{1 - (1-t)q_n}$$

8.1.4 Choix de l'hypothèse

Afin de privilégier une hypothèse, on peut chercher à établir des critères de pertinence :

— Cohérence de la courbe.

- Cohérence de la force de mortalité.
- Simplicité d'application.

Nous pouvons remarquer que les taux de mortalités interpolés sont toujours les plus élevés sous Balducci et les plus bas sous l'hypothèse de distribution uniforme des décès. Une pratique prudente pourrait donc être de choisir l'hypothèse la plus prudente en fonction du produit : Balducci lorsque le sinistre est la mort, distribution uniforme lorsque le sinistre est la vie. Néanmoins, par soucis de simplicité, le choix a été fait de n'en retenir qu'une.

On a vu que l'hypothèse de Balducci mène à une force de mortalité décroissante, or il est raisonnable de supposer celle-ci globalement croissante dû au vieillissement des individus, notamment aux âges élevés. De plus, cette supposition est empiriquement constaté sur les tables de mortalité d'expérience. Ainsi, l'hypothèse de Balducci est rejetée.

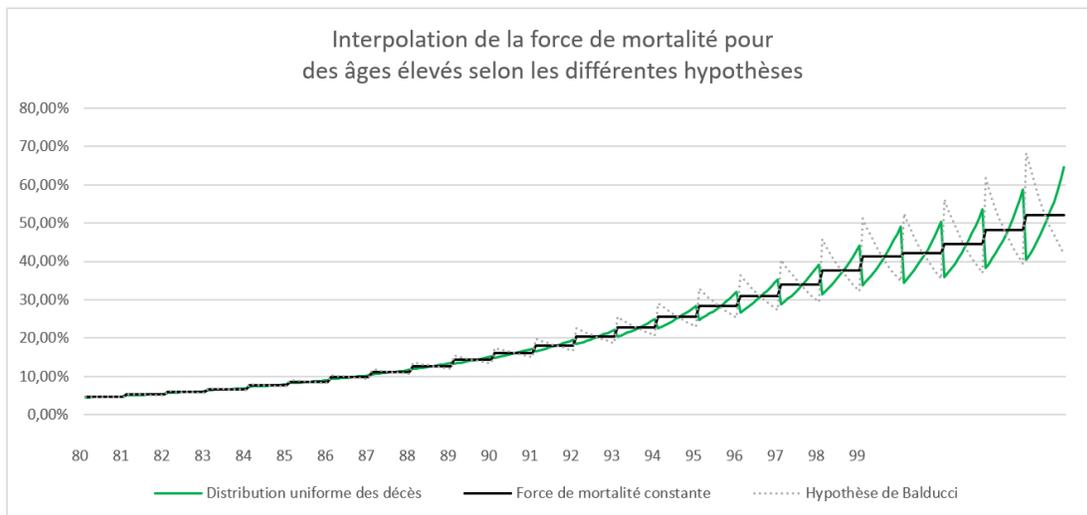


FIGURE 42 – L'hypothèse d'interpolation joue un rôle important pour les âge élevés [1]

Le choix entre les deux autres hypothèses est plus subtil. L'hypothèse exponentielle donne une interpolation des l_n plus lisse que l'hypothèse linéaire. Et bien que cette dernière soit la seule qui donne une force de mortalité croissante comme en pratique, cette croissance est en générale trop prononcée : l'hypothèse exponentielle donne généralement une courbe qui semble plus cohérente. Ainsi, on choisira l'hypothèse de force de mortalité constante. Néanmoins, nous pouvons noter que l'interpolation linéaire ne nécessite que des multiplications alors que l'hypothèse de force de mortalité constante impose une mise en puissance, ce qui

peut alourdir le modèle. Il serait intéressant de vérifier le poids de ce phénomène.

8.2 Approximation des flux de trésorerie mensuels

L'objectif de cette sous-section est d'approcher la valeur annuelle des flux de trésorerie mensuels mais à partir de projections à pas annuels. L'intérêt est de répondre à la contrainte de performance du modèle via une réduction de temps d'exécution du modèle d'un facteur douze. Nous étudierons cette méthode à travers son application lors de la phase de liquidation d'une rente différée.

Les flux de trésorerie sont le produit de ces deux éléments :

- **Un montant calculé**, qui correspond au montant d'une prime, d'une prestation, de frais, etc.
- **Une probabilité** que le montant soit payé/reçu. Il s'agit par exemple de la probabilité que l'assuré soit vivant pour recevoir sa rente, ou qu'il meurt pour recevoir son capital décès.

Plus précisément, il peut également s'agir de fonctions linéaires des éléments précédents.

Soit R_{mens} le montant annuel de la rente mensuelle. Soit CF_n le flux de trésorerie (probabilisé, non actualisé) de l'année n . On a :

$$CF_n = \sum_{k=mn}^{m(n+1)-1} R_{mens} \cdot \frac{k}{m} p_x = R_{mens} \sum_{k=mn}^{m(n+1)-1} \frac{k}{m} p_x$$

On note

$$\overline{np_x} := \frac{1}{m} \sum_{k=mn}^{m(n+1)-1} \frac{k}{m} p_x$$

la moyenne des $\frac{k}{m} p_x$ sur l'année n .

L'objectif est donc de déterminer les deux éléments constitutifs du flux de trésorerie :

$$CF_n = R_{mens} \cdot \overline{np_x}$$

8.2.1 Notations

On note :

— μ_x la force de mortalité.

— i le taux d'actualisation.

— $\delta := \ln(1 + i)$

— $v := \frac{1}{1+i}$ l'actualisation

— ${}_nE_x = {}_n p_x \cdot v^n$ le capital de 1€ différé de n années payable si et seulement si l'assuré est vivant.

— $\ddot{a}_x = \sum_{k=0}^{\infty} {}_k p_x \cdot v^k$ la rente annuelle de 1€ payable à terme à échoir une fois par an tant que l'assuré est vivant.

— $\ddot{a}_{x:\overline{n}|} = \sum_{k=0}^n {}_k p_x \cdot v^k$ la rente annuelle de 1€ payable à terme à échoir une fois par an pendant au plus n années tant que l'assuré est vivant.

— $\ddot{a}_{x:\overline{n}|}^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{mn-1} \frac{k}{m} p_x \cdot v^{\frac{k}{m}}$ la rente annuelle de 1€ payable à terme à échoir et réparti sur m versements par an, pendant au plus n années tant que l'assuré est vivant.

8.2.2 Formule de Woolhouse

Considérons la formule de Woolhouse[10] qui permet de relier la valeur actuelle probable d'une rente temporaire payable annuellement à une rente similaire mais payable mensuellement. :

$$\ddot{a}_x^{(m)} \approx \ddot{a}_x - \frac{m-1}{2m} - \frac{m^2-1}{12m^2}(\delta + \mu_x)$$

Il s'agit d'une approximation au second ordre. Il est possible de supprimer le dernier terme pour se limiter à une approximation au première ordre : cela permet de réduire le poids du calcul et nous verrons dans l'étude de résultat que

celle-ci n'est pas toujours moins précise. On nommera $w1$ l'approximation par le première ordre de la formule et $w2$ celle par le second ordre.

En appliquant cette formule à

$$\ddot{a}_{x:\overline{n}|}^{(m)} = \ddot{a}_x^{(m)} - {}_nE_x \cdot \ddot{a}_{x+n}^{(m)}$$

on obtient :

$$\ddot{a}_{x:\overline{n}|}^{(m)} \approx \ddot{a}_{x:\overline{n}|}^{(m)} - \frac{m-1}{2m} (1 - {}_nE_x) - \frac{m^2-1}{12m^2} (\delta + \mu_x - {}_nE_x(\delta + \mu_{x+n}))$$

8.2.3 Obtention du montant de la rente mensuelle

On est placé dans le cas de la rente différée à versements à échoir réguliers au rythme de m versements par an. On pose

$$v^t = \frac{1}{(1+i)^t}$$

le facteur d'actualisation où i est le taux d'actualisation

A la date de liquidation, la valeur de la rente doit être telle que le capital atteint, RoP (pour *Return of Premium*), égalise la valeurs actuelle probable des prestations futures, i.e.

$$RoP = \sum_{t \in \{\text{datesprestations}\}}^{\infty} R \cdot {}_t p_x v^t = R \sum_{k=0}^{\infty} \frac{k}{m} p_x v^{\frac{k}{m}} = R \cdot m \cdot \ddot{a}_x^{(m)}$$

Le facteur de rente φ_m , avec $\varphi_1 = \varphi_{\text{annuel}}$ est le coefficient qui doit diviser le RoP pour obtenir le montant de la rente. C'est à dire :

$$\varphi_m = m \cdot \ddot{a}_x^{(m)}$$

Si l'on veut obtenir des flux de trésorerie sur base de pas mensuels mais en effectuant des projections à pas annuels, il suffit de déterminer le facteur de rente à pas mensuels. En effet :

$$R_{\text{ann}} = \frac{RoP}{\ddot{a}_x} = \frac{RoP}{\varphi_{\text{annuel}}}$$

$$R_{mens} = \frac{RoP}{m \cdot \ddot{a}_x^{(m)}} = \frac{RoP}{\varphi_m}$$

donc :

$$R_{mens} = \frac{R_{ann}}{m} \frac{\ddot{a}_x}{\ddot{a}_x^{(m)}} = R_{ann} \frac{\varphi_{annuel}}{\varphi_m}$$

Le facteur de rente annuelle est déjà calculé le modèle, il s'obtient immédiatement :

$$\varphi_{annuel} = \ddot{a}_x = \sum_{k=0}^{\infty} {}_k p_x v^k$$

où les v^k ne dépendent que du taux d'actualisation i qui est connu et :

$${}_k p_x = \frac{l_{x+k}}{l_x}$$

où les l_x ont été interpolés dans la section précédente :

$$l_x = l_{n+t} = l_n \left(\frac{l_{n+1}}{l_n} \right)^t$$

Enfin, le facteur de rente mensuelle est approximé en appliquant la version initial de la formule de Woolhouse, ce qui permet de déduire le montant de rente mensuelle R_{mens} .

8.2.4 Approximation des probabilités mensuelles de décès

En repartant de la formule de $\overline{{}_n p_x}$, et en considérant le cas particulier $i = 0$, ce qui entraîne $\delta := \ln(1 + i) = 0$ et $v = 1$, on obtient :

$$\overline{{}_n p_x} := \frac{1}{m} \sum_{k=mn}^{m(n+1)-1} \frac{{}_k p_x}{m} = \frac{1}{m} \sum_{k=mn}^{m(n+1)-1} \frac{{}_k p_x v^{\frac{k}{m}}}{m} = \ddot{a}_{x:n+1}^{(m)} - \ddot{a}_{x:\bar{n}}^{(m)}$$

Ainsi, en reprenant la formule obtenue à partir de celle de Woolhouse on obtient :

$$\begin{aligned} \overline{{}_n p_x} = \ddot{a}_{x:n+1}^{(m)} - \ddot{a}_{x:\bar{n}}^{(m)} &\approx \ddot{a}_{x:\overline{n+1}} - \frac{m-1}{2m} (1 - {}_{n+1}E_x) - \frac{m^2-1}{12m^2} [\delta + \mu_x - {}_{n+1}E_x(\delta + \mu_{x+n+1})] \\ &\quad - (\ddot{a}_{x:\bar{n}} - \frac{m-1}{2m} (1 - {}_n E_x) - \frac{m^2-1}{12m^2} [\delta + \mu_x - {}_n E_x(\delta + \mu_{x+n})]) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\approx \ddot{a}_{x:\overline{n+1}|} + \frac{m-1}{2m}(-1 + {}_{n+1}E_x) + \frac{m^2-1}{12m^2}[-\delta - \mu_x + {}_{n+1}E_x(\delta + \mu_{x+n+1})] \\ &\quad - \ddot{a}_{x:\overline{n}|} + \frac{m-1}{2m}(1 - {}_nE_x) + \frac{m^2-1}{12m^2}[\delta + \mu_x - {}_nE_x(\delta + \mu_{x+n})] \end{aligned}$$

$$\overline{np}_x \approx \ddot{a}_{x:\overline{n+1}|} - \ddot{a}_{x:\overline{n}|} + \frac{m-1}{2m}({}_{n+1}E_x - {}_nE_x) + \frac{m^2-1}{12m^2}({}_{n+1}E_x \cdot \mu_{x+n+1} - {}_nE_x \cdot \mu_{x+n})$$

Enfin, on approche μ_x par

$$\mu_x \approx -\frac{1}{2}\ln(p_{x-1} \cdot p_x) = -\frac{1}{2}\ln\left(\frac{l_{x+1}}{l_{x-1}}\right)$$

ce qui permet d'obtenir une approximation de \overline{np}_x , puis enfin du flux de trésorerie de l'année CF_n

8.3 Etude des écarts

La section précédente fournit un approximation des flux mais sans en donner une mesure de l'erreur. Pour cela on peut commencer par étudier empiriquement les écarts. On considère un assuré entamant une rente différée le 01/01/2020 et la liquidant le 01/01/2040. Nous étudierons les écarts en fonction de son âge à la liquidation.

8.3.1 Ecart sur le facteur de rente

On mesure l'erreur d'approximation du facteur de rente en fonction de l'âge à la liquidation

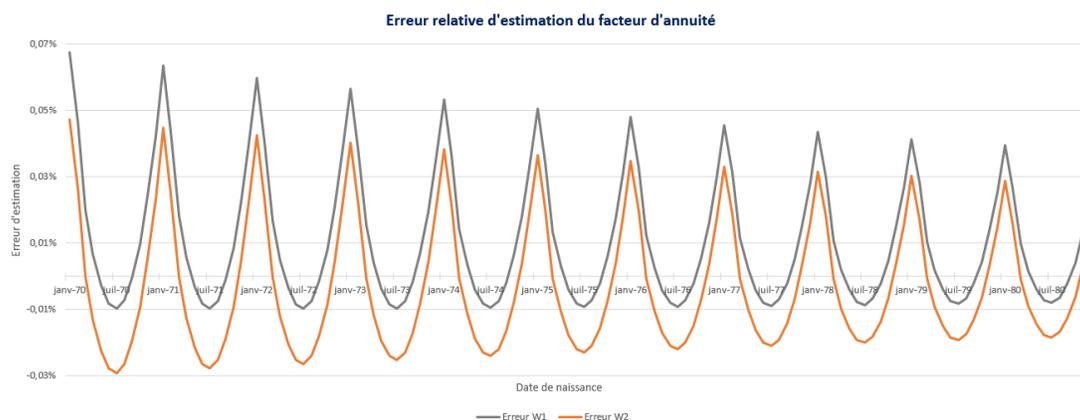


FIGURE 43 – Erreur d'approximation du facteur de rente

L'erreur est d'autant plus grande que l'assuré est âgé à la liquidation. Néanmoins, elle reste très faible : 0,07% pour un assuré liquidant sa rente à 70ans.

On constate de plus que l'approximation du premier ordre semble meilleure en milieu d'année et que celle du second ordre semble meilleure en fin et début d'année. En réalité, cela est dû à l'âge à la liquidation : l'approximation du première ordre est meilleure lorsque l'âge à la liquidation est demi-entier, et celle du second ordre lorsqu'il est entier.

L'effet est plus visible en se focalisant sur une année. On remarque également des discontinuité pour certains jours précis.

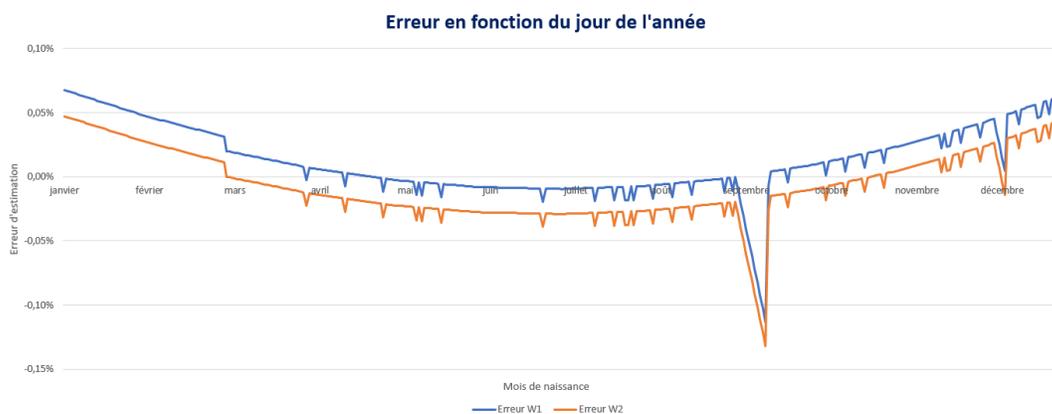


FIGURE 44 – Erreur d'approximation du facteur de rente

L'approximation du facteur de rente est tout à fait satisfaisante.

8.3.2 Écarts sur les probabilités sous-jacentes

Les $\overline{np_x}$ sont à calculer pour chaque année. L'erreur d'approximation peut donc évoluer en fonction de l'âge de l'assuré au cours de projection. Notons AdP l'âge de l'assuré au début de la projection. On observe alors l'erreur d'approximation :

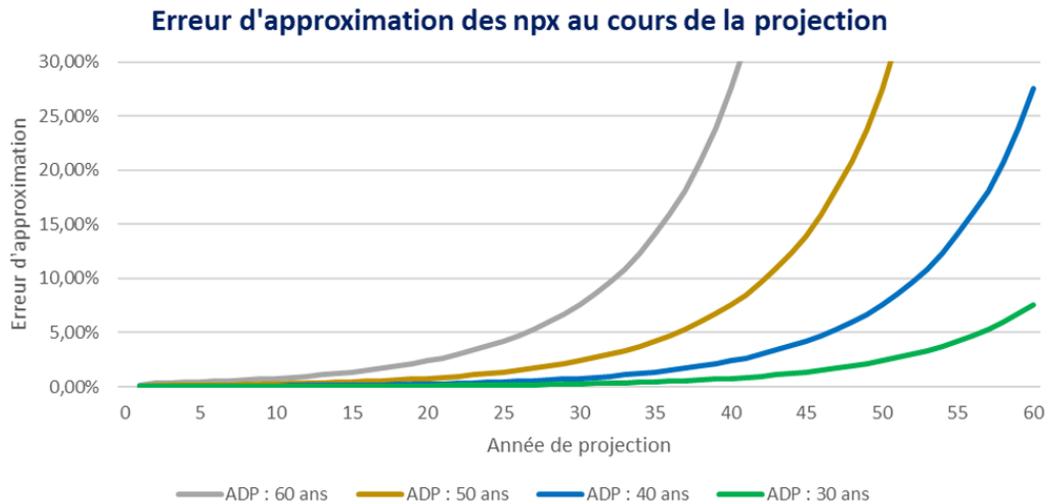


FIGURE 45 – Erreur d'approximation des $\overline{np_x}$ au cours de la projection

L'approximation des $\overline{np_x}$ est précise jusqu'à certains âges mais se dégrade brutalement pour les âges très élevés. On observe par exemple que l'erreur est de 3% lorsque l'assuré a 80 ans mais dépasse les 30% lorsqu'il atteint 100 ans. Ce résultat rend l'application de la méthode d'approximation non applicable pour la modélisation des flux de trésorerie liés aux âges extrêmes.

9 Prudent Harmonized Reduced Set of Scenarios

9.1 Contexte

9.1.1 Valorisation du passif : du stochastique pour la vie

En assurance non-vie et similaire à la non-vie, la valeur des flux de trésorerie projetés est, de manière générale, linéaire le long des scénarios économiques. Cela a pour conséquence que l'espérance des flux selon les scénarios est identique aux flux selon le scénario moyen. Ainsi, l'évaluation du *Best Estimate* peut se faire de manière déterministe puisqu'il suffit d'effectuer une projection selon un scénario moyen.

En assurance vie et similaire à la vie, la présence d'options et de garanties introduit une non-linéarité qui affaiblit cette méthode : les flux générés selon le scénario moyen ne correspondent plus à l'espérance des flux le long des scénarios et il devient alors nécessaire de procéder à une modélisation stochastique de tous les scénarios.

La valeur de ces options et garanties se nomme la *TVOG* : « *Time Value of Options and Guarantees* ». Elle représente l'écart entre le *BE* stochastique, qui tient compte des effets non linéaires de ces clauses, et le *BE* déterministe, qui n'en tient pas compte

Cependant, l'évaluation stochastique du passif représente un coût en termes de compétences et de calculs que toutes les entreprises n'ont pas. Ainsi, l'EIOPA est en train de développer l'initiative *PHRSS* : *Prudent Harmonized Reduced Set of Scenario* qui consiste en une méthode intermédiaire entre la valorisation déterministe et stochastique. Ce projet vise à permettre aux entreprises valorisant leur passif vie de manière déterministe d'obtenir une méthode plus fiable d'évaluation de leurs provisions techniques sans avoir à recourir à la complexité des modèles stochastiques.

9.1.2 La non linéarité en assurance sur la vie

Nous présentons ici quelques clauses et phénomènes brisant la linéarité entre les scénarios économiques et les résultats d'estimation du *Best Estimate*.

La provision pour dépréciation durable

La provision pour dépréciation durable est constituée pour reconnaître une perte de valeur des actifs qui n'est pas jugée temporaire. Elle est dotée lorsque les

actifs sous-jacents ont des fluctuations qui franchissent des seuils de niveau et de durée.

Les rachats structurelles de contrat

Les rachats structurels de contrat surviennent lorsque les assurés décident de racheter leur contrat en raison de facteurs économiques externes. Par exemple, si les taux montent, alors les contrat d'épargne des assurés deviennent moins avantageux relativement aux autres investissements ce qui modifie les probabilités de rachats.

La participation discrétionnaire

La participation discrétionnaire est intimement liée à la performance économique et financière de l'assureur mais il y a une forte asymétrie entre les situations de performances hautes et basses.

9.1.3 Objectif

L'objectif de l'EIOPA est de fournir aux entreprises ayant des contrats avec options et garantie une approche reflétant un niveau prudent de la *TVOG* dans le calcul de leurs provisions techniques.

Les entreprises concernées sont celles effectuant des calculs de provision technique déterministes en raison de contraintes de calcul, et qui sont catégorisées comme "petites et non complexes", dont la notion est définie quantitativement par le régulateur. Il s'agit de maintenir une proportionnalité entre l'apport des méthodes et le coût de leur mise en place.

Pour cela, l'EIOPA fourni une méthodologie de construction des scénarios de sorte à garantir une évaluation prudente de la *TVOG*.

Dans le contexte de la bibliothèque *Life Cash Flows*, nous sommes intéressés par l'effet de réduction de temps de calcul que cette méthode permet puisque la vitesse d'exécution est un point clé de la bibliothèque. Cela est intéressant pour des clients à l'international qui sont peu habitués au stochastique. Nous essaierons donc de l'appliquer au modèle ALM : des résultats convenables permettraient de calculer des SCR rapidement qui seraient ensuite convertit en *Risk Adjustment* via la méthodologie détaillée en section 6.

9.2 Les Générateurs de Scénarios Économiques

Les générateurs de scénarios économiques sont au coeur de la modélisation stochastiques : ce sont eux qui structurent les futurs possibles sur lesquels le *Best Estimate* prend son espérance.

9.2.1 Définition

Un Générateur de Scénarios Economiques, GSE, est un modèle qui simule l'évolution de plusieurs variables économiques appelées facteurs de risque (inflation, indices actions, taux d'intérêt...). L'utilisation des GSE est utile pour des évaluations stochastiques du passif, puisqu'ils permettent de prendre en compte l'ensemble des futurs possibles pour calculer les *Best Estimate*. Mathématiquement, cela se définit ainsi :

- Un facteur de risque \tilde{R} est une courbe : $(\tilde{R}(t))_{t \in [1, T]}$
- Un scénario économique est un ensemble de facteurs de risque : $\left((RF_i(t))_{t \in [1, T]} \right)_{i \in [1, n]}$

Un facteur de risque peut également être un ensemble de courbes. Par exemple, l'indice action est une courbe simple : $\tilde{R}(t)$ est le rendement des actions en t , mais les courbes de taux est un ensemble de courbes : $\tilde{R}(t)$ correspond à la courbe des taux projeté en t

9.2.2 Construction

Afin de créer des jeux de scénarios, les GSE fonctionnent ainsi :

1. Choix des facteurs de risque et de l'univers de projection (monde réel ou risque neutre).
2. Pour chaque facteur de risque, choix du modèle de diffusion, i.e. équations décrivant l'évolution du facteur (ex : B&S).
3. Calibrage du modèle.
4. Ajustements pour que les courbes respectent certaines conditions, notamment :
 - **La martingalité** : Les courbes doivent avoir, en moyenne, le même rendement que la courbe initiale de taux sans risque fourni par l'EIOPA.

- **La Market-Consistency** : La volatilité des courbes doit être cohérente avec celle du marché (que ce soit la volatilité réelle si le GSE est en monde réelle ou implicite s'il est en risque-neutre)

La création de scénarios économiques via un GSE est une partie à part. Nous cherchons ici à appliquer la méthode PHRSS donc nous partons de jeux de scénarios robustes déjà créés. Nous utiliserons deux jeux de mille scénarios addactis : un jeu de 2021, qui précède la remontée des taux et un jeu de 2023 qui la succède. Ceci permettra d'observer qualitativement de quelle manière l'efficacité de la méthode *PHRSS* dépend de l'environnement économique.

Les facteurs de risque qui seront utilisés sont :

- Les indices actions
- Les indices immobiliers
- Les courbes de taux
- Le taux d'inflation

9.3 Génération d'un ensemble réduit de scénarios

La première phase de génération de l'ensemble réduit de scénarios consiste à déterminer un échantillon de 9 scénarios économiques. Pour cela, trois méthodes sont proposées, qui sont de la plus simple à la plus complexe :

- **Méthode 1** : Choix aléatoire des trajectoires stochastiques.
- **Méthode 2** : Construction de trajectoires par lignes de niveau de quantile.
- **Méthode 3** : Détermination de scénarios représentatifs via l'espérance conditionnelle et la recherche du plus proche voisin.

Chacune de ces méthodes nécessite de partir d'un jeu complet de scénarios économiques. Nous commencerons par expliquer ces méthodes et les illustrer avec leur application sur notre jeu de scénario de 2023, puis nous étudierons leur efficacité sur l'évaluation de la *TVOG* dans le cadre des scénarios de 2021 et 2023.

9.3.1 Méthode 1 - Choix aléatoire des trajectoires stochastiques

Cette méthode consiste simplement à choisir aléatoirement les neuf scénarios à retenir. Naïve, elle sert en réalité à mesurer qualitativement la pertinence de la

mise en place de méthodes plus complexes.

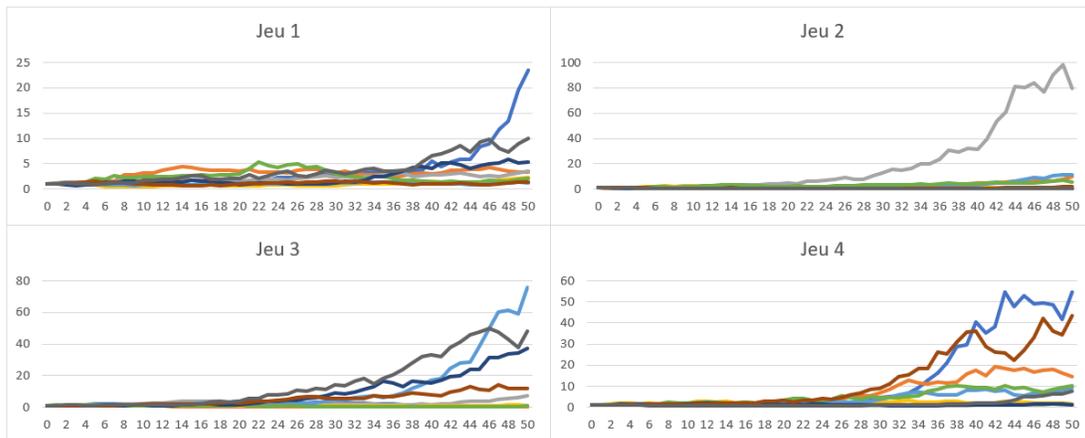


FIGURE 46 – Simulations retenues de l'indice action en application de la méthode 1

C'est la seule méthode dont le choix des jeux de scénarios fait intervenir le hasard. L'itération de cette méthode permet de voir que, comme on s'y attendrait, les jeux sont très différents les uns des autres.

Avantages : Méthode facile à implémenter et dont l'ensemble de scénarios généré est constitué de scénarios issus du GSE.

Inconvénient : Il y a une forte erreur d'échantillonnage, et les scénarios sont difficilement interprétables.

9.3.2 Méthode 2 – Construction de trajectoires par quantile

Il s'agit de construire de nouveaux scénarios correspondant à des trajectoires moyennes pour chaque quantile. On procède ainsi :

1. On définit des quantiles particuliers q_1, \dots, q_9 (ex : 10%, 20%, ..., 90%)
2. Pour chaque quantile q_i , on définit le scénario q_i ainsi :
 - Pour chaque facteur de risque, pour chaque date t , on regarde l'ensemble des évolutions entre $t - 1$ et t de ce facteur de risque.

- L'évolution du facteur de risque entre $t - 1$ et t du scénario q_i est le quantile q_i de ces évolutions.

Remarque : Pour les indices de type action, il est préférable de considérer le niveau de l'indice et non le niveau de son évolution. Cela est dû à leur volatilité élevée : par exemple, une forte augmentation sur une année est courante, mais une sur dix ans est irréaliste.

Exemple : Pour déterminer la valeur en $t = 3$ du facteur de risque inflation du scénario de quantile $q_2 = 20\%$:

- On génère 1000 scénarios. On a donc 1000 trajectoires d'inflation.
- On détermine l'ensemble des valeurs d'évolution de l'inflation entre $t = 2$ et $t = 3$
- On prend le quantile 20% de ces valeurs.

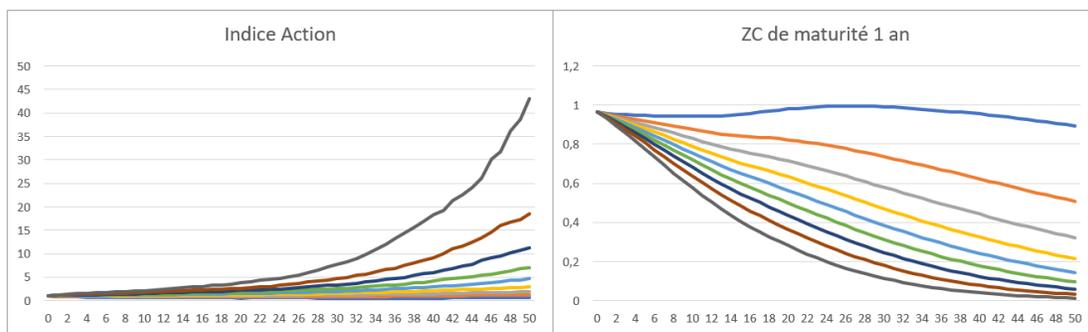


FIGURE 47 – Simulations construites par la méthode 2

Avantages : Par construction et comme nous le voyons sur le graphique, les trajectoires sont lisses et stables. De plus, elles sont facilement interprétables.

Inconvénient : Il n'y a pas de volatilité interne au sein des scénarios, or cette dernière influe certains passifs (ex : passifs à effets de seuil comme la PDD, ou encore la valeur des contrats où les assurés peuvent, pour un même rendement global, racheter plus si le rendement chute fortement à une année donnée).

9.3.3 Méthode 3 - Détermination de scénarios représentatifs

Cette méthode consiste à choisir neuf scénarios stochastiques de manière à ce que chacun soit le plus proche du scénario moyen parmi les scénarios similaires

en termes de résultat.

1^{ère} étape : Ordonner les scénarios

La première étape consiste à ordonner les scénarios de la manière suivante :

- On commence par construire un portefeuille de référence contenant des obligations, actions et biens immobiliers. Les proportions peuvent se baser sur le portefeuille de référence de l'EIOPA.
- Ensuite, on définit un horizon de référence H , on génère des scénarios stochastiques de manière classique puis on calcule la valeur du portefeuille à cet horizon.
- Enfin, on ordonne les scénarios en fonction de la valeur du portefeuille à laquelle ils aboutissent et on définit des quantiles comme en méthode 2.

Remarque : Se contenter de sélectionner les scénarios correspondant aux quantiles aurait le même inconvénient qu'en méthode 1 : un fort biais d'échantillonnage.

2^e étape : Définir des scénarios moyens

On a actuellement des scénarios ordonnés selon la valeur P qu'ils donnent à un portefeuille à un horizon H . On note P_α la valeur du portefeuille correspondant au quantile q_α . On se sert alors de l'espérance conditionnelle pour définir le scénario moyen qui mène à une valeur de portefeuille P_α en H . Pour cela, pour chaque P_α :

- On définit un intervalle de valeurs I contenant P_α .
- On regarde l'ensemble des scénarios menant à une valeur P dans I .
- On construit un scénario moyen depuis cet ensemble.

Remarque : Se contenter de prendre ces scénarios moyens aurait le même inconvénient qu'en méthode 2 : trop peu de volatilité interne aux scénarios.

3^e étape : Choisir les scénarios par la méthode du plus proche voisin

À ce stade, pour chaque quantile sélectionné, on dispose :

- D'un sous-ensemble des scénarios.
- Du scénario moyen de ce sous-ensemble.

On utilise alors l'algorithme de recherche des plus proches voisins pour trouver le scénario le plus proche du scénario moyen. Plus généralement, il suffit d'effectuer un calcul de distance. Ce scénario trouvé est celui retenu pour le quantile sélectionné.

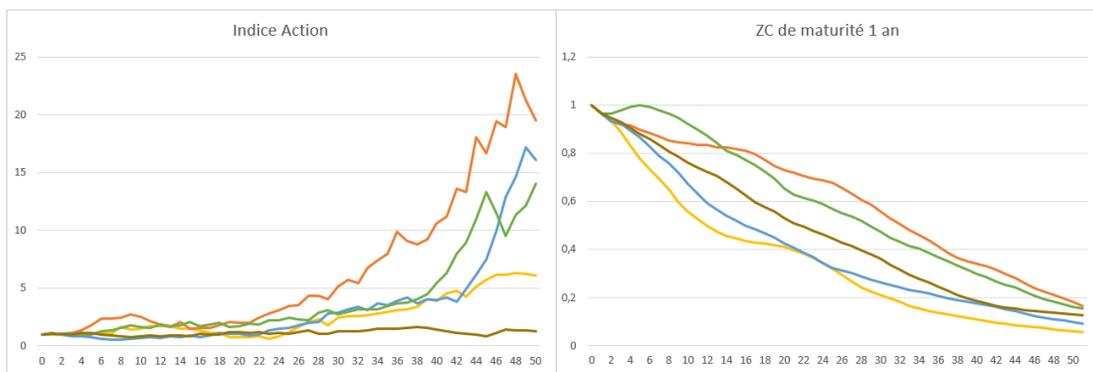


FIGURE 48 – Quelques simulations retenues par la méthode 3

Avantages : Les scénarios sont tous issus du GSE. Ils ont des trajectoires purement stochastiques et donc ont une volatilité interne cohérente. Les trajectoires sont interprétables. L'erreur d'échantillonnage est réduite.

Inconvénients : La méthode dépend de l'utilisation d'un portefeuille de référence qui peut ne pas être représentatif pour toutes les entreprises. De plus, bien que réduite, l'erreur d'échantillonnage reste présente.

9.4 Ajustement des scénarios

L'échantillon des neuf scénarios de référence est désormais obtenu. La seconde phase consiste à ajuster ces scénarios afin de leur donner le mieux possible deux propriétés cruciales :

- La risque-neutralité (via la martingalité).
- La market-consistency.

Pour cela, deux ajustements peuvent être effectués :

- Ajustement A : Correspondance des moments (Moment Matching).
- Ajustement B : Réaffectation des poids (Reweighting).

La martingalité est importante : sans son respect, les actifs n'évolueront pas en moyenne selon le taux sans risque, ce qui sera source de fuite.

9.4.1 Correspondance des moments

L'objectif est d'obtenir des courbes martingales. Pour cela, on cherche à conserver la constance de l'espérance des facteurs de risque. On construit un facteur de risque ajusté par récurrence :

- On part du facteur de risque initial en $t = 0$, qui est également le facteur de risque ajusté.
- On définit le facteur de risque ajusté en $t + 1$:
- On considère le facteur de risque ajusté en t .
- On lui applique la même évolution que le facteur de risque initiale (multiplication par $\frac{\tilde{R}(t+1)}{\tilde{R}(t)}$).
- On définit et applique un facteur d'ajustement de sorte à conserver l'égalité $\mathbb{E}[D(t) * \tilde{R}(t)] = \tilde{R}(0)$, où D est le déflateur.

On obtient donc :

$$\begin{cases} \tilde{R}_{aj}(0) = \tilde{R}_{ini}(0) \\ \tilde{R}_{aj}(t) = \tilde{R}_{aj}(t-1) \times \frac{\tilde{R}_{ini}(t)}{\tilde{R}_{ini}(t-1)} \times AJ_t \\ AJ_t = \frac{\tilde{R}_{ini}(0)}{\mathbb{E} \left[D_{aj}(t) \times \tilde{R}_{aj}(t-1) \times \frac{\tilde{R}_{ini}(t)}{\tilde{R}_{ini}(t-1)} \right]} \end{cases}$$

Notons que le déflateur doit être ajusté en premier pour servir dans l'ajustement des autres facteurs de risque. On l'ajuste avec la même formule en posant $\tilde{R}(t) = 0$.

Enfin, certains facteurs de risque sont à double indice, comme le prix du zéro-coupon $P(t, t + K)$. La formule s'adapte alors en remplaçant alors tous les

$\tilde{R}(t)$ par $P(t, t + K)$. C'est à dire, pour tout $K \in \mathbb{N}$:

$$\begin{cases} P_{aj}(0, K) = P_{ini}(0, K) \\ P_{aj}(t, t + K) = P_{aj}(t - 1, t - 1 + K) \times \frac{P_{ini}(t, t + K)}{P_{ini}(t - 1, t - 1 + K)} \times AJ_{t,K} \\ AJ_{t,K} = \frac{P(0, 0 + K)}{E \left(D_{adj}(t) \times P_{aj}(t - 1, t + K - 1) \times \frac{P_{ini}(t, t + K)}{P_{ini}(t-1)} \right)} \end{cases}$$

Le graphique ci-dessous illustre qualitativement l'effet de l'ajustement : une réduction de la volatilité et de la valeur des courbes.

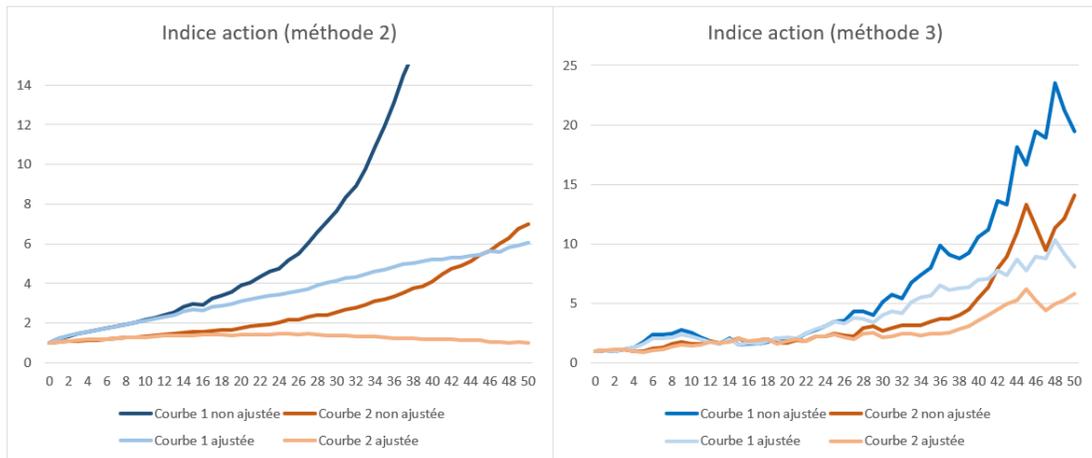


FIGURE 49 – Effet de l'ajustement sur deux simulations de l'indice action.

L'avantage principal de cette méthode est qu'elle permet une vérification exacte des test de martingalité.

9.4.2 Réaffectation des poids

L'objectif est de coller au mieux à la martingalité et à la market-consistency. Généralement, un GSE donne un poids uniforme à tous les scénarios : ils ont tous la même probabilité d'arriver. Il s'agit ici de modifier les poids afin d'améliorer les propriétés globales de l'échantillon. Pour cela, on définit des mesures d'erreur pour la martingalité et la market consistency, puis on utilise un algorithme d'op-

timisation qui trouve la pondération minimisant ces erreurs. Ce réajustement ne sera pas étudié dans ce mémoire mais est une bonne piste d'amélioration ultérieure.

9.5 PHRSS : Application

Afin d'évaluer la méthode *PHRSS*, nous l'appliquerons d'abord sur un modèle dit "de marché" contenant des portefeuilles d'actif et de passif de référence pour la date de clôture 2023 construits par addactis[®]. Ensuite, nous l'appliquerons de nouveau en remplaçant le portefeuille de passif par un passif constitué des produits modélisés par la bibliothèque *Life Cash Flows*

Le modèle de marché présente un portefeuille constitué majoritairement d'obligations pour l'actif et d'épargne euros pour le passif. Ces caractéristiques sont les suivantes :

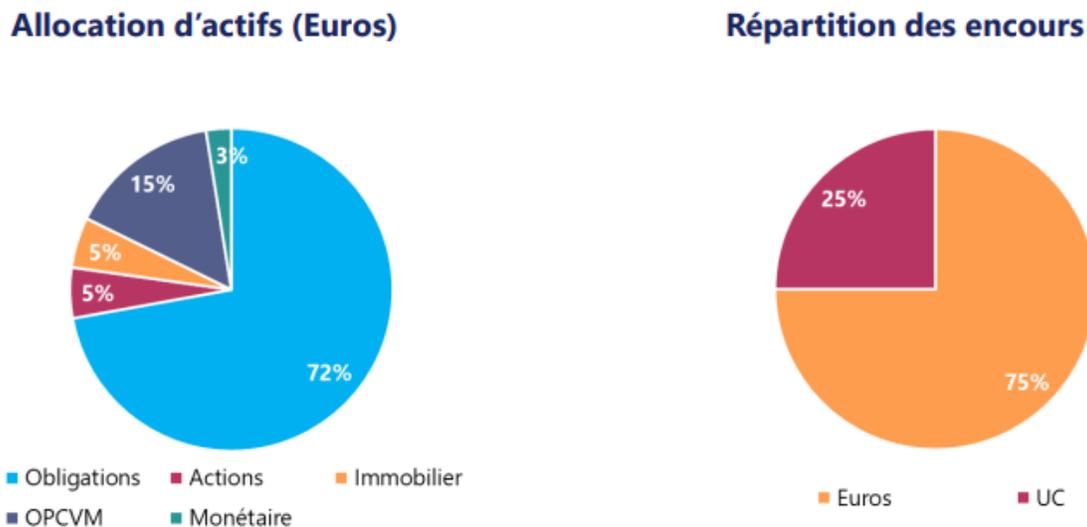


FIGURE 50 – Portefeuille de marché.

Nous pouvons noter les caractéristiques suivantes :

Notons que la *TVOG* ne représente qu'une très petite partie du *Bes Estimate*. Or, c'est initialement le *BE* stochastique qui est approché donc une bonne approximation de la *TVOG* nécessite une excellente approximation du *Best Estimate*.

En ce sens, la valeur plus élevée de la *TVOG* en 2021, résultant de taux plus bas et donc d'une plus grande activation des options et garanties, devrait a priori conduire à une évaluation plus exacte de la *TVOG* puisque cette dernière

Indicateur (en euros)	2021	2023
<i>BE</i> stochastique	1 349 384 135	1 262 102 832
<i>BE</i> déterministe	1 312 767 851	1 246 302 668
<i>TVOG</i>	36 616 284	15 800 165
<i>TVOG</i> (en % du <i>BE</i>)	2,71%	1,25%
Fuite relative (en % de VM)	0,01%	0,19%

TABLE 4 – *BE*, *TVOG* et fuite du modèle de marché

devrait être plus facilement captée par les scénarios. Concrètement, pour une même erreur sur le *BE*, plus la *TVOG* est proportionnellement élevée et moins son erreur d'approximation devrait l'être.

Concernant la fuite, on observe qu'elle est plus élevée sur les scénarios de 2023, ce qui illustre sa dépendance à l'aléatoire : en taux élevés, ceux-ci sont aussi plus volatils, ce qui accroît la variance des résultats et donc la fuite générée. Par ailleurs, la fuite relative sert de point de référence pour l'évaluation de la fuite des différentes méthodes : celle-ci doit être le moins dégradée possible. Notons qu'en pratique, une fuite inférieure à 0,2% est souhaitable, ou a minima inférieure à 0,5%. Si l'application des méthodes *PHRSS* augmente la fuite par rapport au jeu de scénario sur lequel elles se base, cela compliquera le respect de cette contrainte.

9.5.1 Les scénarios utilisés

Nous utilisons deux jeux de mille scénarios : l'un de 2021 dont les taux sont globalement bas, et l'un de 2023 qui est après la montée des taux. Pour chacun des jeux de scénarios, nous utilisons quatre facteurs de risque :

- Le rendement cumulé action (deux indices).
- Le rendement cumulé immobilier.
- La courbe des taux d'intérêt.
- Le taux d'inflation.

Notons que chacun de ces facteurs de risque peut se présenter sous plusieurs points de vue :

- Rendements ou rendements cumulés pour l'action et l'immobilier.
- Taux d'intérêt ou prix zéro-coupon pour la courbe des taux
- Taux d'inflation ou inflation cumulée pour l'inflation.

Ceci a une importance pour les méthodes deux et trois puisqu'elles construisent et utilisent des scénarios par quantile, or le résultat dépend fortement du point de vue utilisé. Par exemple, pour les indices immobilier et action, la moyenne des rendements cumulés croît bien plus vite que les rendements moyens cumulés. Ceci

est dû à la mise en exponentielle des rendements qui décale la symétrie de leur loi vers les valeurs au dessus de la moyenne.

Ainsi, il est intéressant d'appliquer les méthodes 2 et 3 en y considérant les scénarios sous différentes formes. Dans notre cas, des résultats bien meilleur sont obtenus en considérant les rendements cumulés plutôt que les rendements annuels.

9.5.2 Méthode 1 - Choix aléatoire des trajectoires stochastiques

La méthode 1 vise plus à être comparée avec les deux autres méthodes qu'à servir effectivement en pratique. Elle illustre surtout la nécessité d'utiliser un grand nombre de scénarios de manière générale, et donc de voir comment les deux méthodes suivantes permettent de palier cette contrainte.

Étant donné l'aléa inhérent à cette méthode, on l'effectue cent fois. Comme on pouvait s'y attendre, les résultats sont beaucoup trop volatils pour être utilisés en pratique : La *TVOG* est estimée à plus de triple de sa valeur presque trois fois sur quatre, et avec une valeur négative presque une fois sur deux.

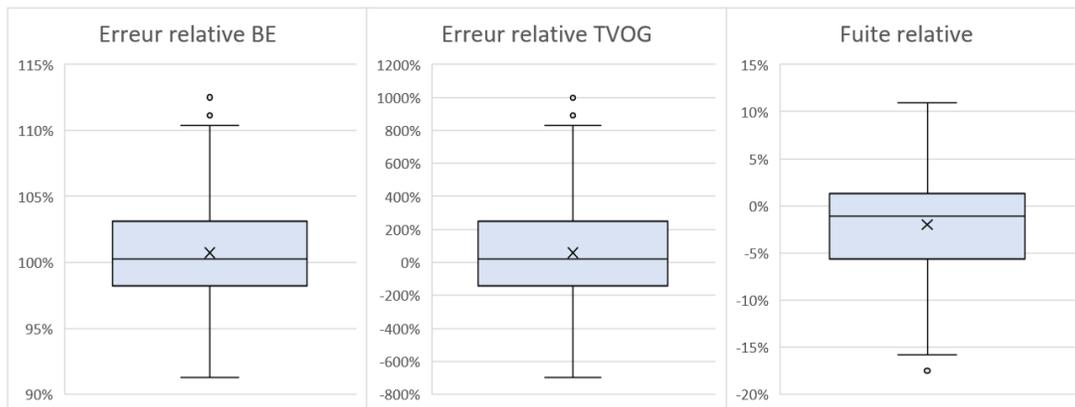


FIGURE 51 – Efficacité de la méthode 1 - Scénarios 2023

On remarque par ailleurs que la fuite du modèle est généralement très importante.

9.5.3 Méthode 2 – Construction de trajectoires par quantile

La méthode 2 offre des résultats très différents en fonction du jeu de scénarios. Nous analyserons l'erreur à travers les ratios des résultats de la méthode 2 sur les résultats en pleinement stochastique : $\frac{BE_{M2}}{BE_{Sto}}$ et $\frac{TVOG_{M2}}{TVOG_{Sto}}$. On regarde également la

fuite générée :

Indicateur (en euros)	2021	2023
<i>BE</i> stochastique	1 349 384 135	1 262 102 832
<i>BE</i> méthode 2	1 312 195 210	1 256 515 758
<i>TVOG</i> stochastique	36 616 284	15 800 165
<i>TVOG</i> méthode 2	-572 641	10 213 090
Ratio <i>BE</i>	97,24%	99,56%
Ratio <i>TVOG</i>	-1,6%	64,6%
Fuite relative (en % de VM)	4,07%	1,39%

TABLE 5 – Approximation de la *TVOG* par la méthode 2

La méthode 2 s'avère inefficace : la fuite est beaucoup trop élevée et l'évaluation de la *TVOG* est aberrante avec des taux bas puisque celle-ci est négative.

Il est par ailleurs surprenant que l'estimation soit plus exacte pour l'année 2023. En effet, la principale faiblesse de la méthode 2 est que les scénarios utilisés n'ont presque pas de volatilité interne, or celle-ci est plus élevée pour les scénarios de 2023 ce qui devrait donc engendrer une plus grande perte d'information. Néanmoins, il est possible que cette différence soit uniquement dû à la composition spécifique du portefeuille. Il pourrait être intéressant d'étudier l'efficacité de la méthode en fonction du portefeuille, mais un écart significatif sera probablement toujours présent dû au manque de volatilité interne.

9.5.4 Méthode 3 - Détermination de scénarios représentatifs

En amont de son application, cette méthode nécessite de clarifier la manière dont sont calculées les distances entre simulations. En effet, une simulation correspond à un ensemble de facteurs de risque, qui eux même peuvent correspondre à un ensemble de courbes. Il existe donc plusieurs manières de définir les distances. Dans notre cas, une simulation correspond à :

- Deux courbes de rendements action (car deux indices utilisés)
- Une courbe de rendement immobiliers
- Cinquante courbes des (une par année de projection)

Nous définissons notre distance entre simulations en trois temps : définition initiale, normalisation, pondération. L'objectif est de, pour chaque quantile, calculer la distance d'une simulation du quantile à la simulation de référence du quantile.

Définition initiale

Dans un premier temps, nous définissons la distance entre deux simulations en posant une distance euclidienne sur trois niveaux :

Soient deux courbes $C_p = (p_1, \dots, p_t)$ et $C_q = (q_1, \dots, q_t)$. On définit la distance D_c entre ces deux courbes comme étant leur distance euclidienne :

$$D_c(C_p, C_q) := \sqrt{\sum_{i=1}^t (p_i - q_i)^2}$$

Soient deux facteurs de risque $R_x = (C_1^x, \dots, C_k^x)$ et $R_y = (C_1^y, \dots, C_k^y)$, avec C_p^x la courbe p du facteur de risque R_x . On définit la distance D_r entre ces deux facteurs de risque comme la distance euclidienne des distances entre leurs courbes

$$D_r(R_x, R_y) := \sqrt{\sum_{i=1}^k D_c(C_i^x, C_i^y)^2}$$

Soient deux simulations $Sim_\alpha = (R_1^\alpha, \dots, R_n^\alpha)$ et $R_\beta = (R_1^\beta, \dots, R_n^\beta)$, avec R_x^α le facteur de risque x de la simulation S_α . On définit la distance D_s entre ces deux simulations comme la distance euclidienne des distances entre leurs facteurs de risque

$$D_s(Sim_\alpha, Sim_\beta) := \sqrt{\sum_{i=1}^n D_r(R_i^\alpha, R_i^\beta)^2}$$

La logique derrière ce choix est la suivante :

Première distance : une courbe de longueur t peut être vue comme un point dans un espace de dimension t et dont les coordonnées sont les points de la courbe. Exemple : indice action.

Deuxième distance : Un facteur de risque de k courbes de longueurs t peut lui-même être vu comme une courbe de k points dans un espace de dimension t . Ceci concerne les courbes de taux, qui correspondent à une courbe $YC(P, P+t)_{t \in [1,50]}$ par année de projection P .

Troisième distance : Une simulation de n facteurs de risque peut être vue comme une courbe de k points dans un espace à n dimensions.

Ces distances ont pour but d'être appliquées, pour chaque quantile, à tous les couples (Simulation i , Simulation de référence du quantile) afin de déterminer la simulation la plus proche de celle de référence.

Normalisation

Dans un second temps, nous normalisons les distances entre les facteurs de risque. Ceci est nécessaire car l'ordre de grandeur des distances dépend du type de facteur de risque. Par exemple, les distances entre les indices actions sont en moyenne mille fois supérieures à celles relatives aux taux d'intérêt. Cela est dû notamment à la volatilité plus forte pour les actions qui entraîne des distances naturellement plus grande entre les points des courbes.

Pour corriger ce phénomène, on définit une nouvelle distance \overline{D}_r de sorte à ce que, pour chaque facteur de risque, sa moyenne le long de simulations soit 1. On pose ainsi :

$$D_{moy}(x) := \frac{1}{k} \sum_{\alpha=1}^k D_r(R_x^\alpha, R_x^{ref})$$

la moyenne le long des simulations du facteur de risque x avec le facteur de risque x de la simulation de référence. Puis :

$$\overline{D}_r(R_x, R_{ref}) := \frac{D_r(R_x, R_{ref})}{D_{moy}(x)}$$

Ceci permet de donner par défaut le même poids à tous les facteurs de risque quelle que soit leur nature (taux, actions, inflation, etc.)

Pondération

Dans un troisième temps, nous permettons l'application de pondérations sur les facteurs de risque. En effet, certains étant plus présent dans le portefeuille, il est pertinent de donner plus de poids aux facteur de risque qui l'influence. Ainsi, soit $\varrho = (\rho_1, \dots, \rho_n)$ un vecteur de pondération, on définit :

$$D_\varrho(Sim_\alpha, Sim_{ref}) := \sqrt{\rho_i \sum_{i=1}^n \overline{D}_r(R_i^\alpha, R_i^{ref})^2}$$

Ainsi, en se basant sur les proportions relatives obligations, actions et immobilier, on propose un poids de 88% sur les obligations, 6% sur les actions et 6%

sur l'immobilier. Des test faisant varier les pondérations montrent celle-ci donne effectivement de meilleurs résultats qu'une pondération uniforme, entièrement concentrée sur la courbe de taux, ou légèrement moins concentré sur la courbe des taux. Les résultats s'avèrent cependant non concluant :

Indicateur (en euros)	2021	2023
<i>BE</i> stochastique	1 349 384 135	1 262 102 832
<i>BE</i> méthode 3	1 343 661 910	1 268 220 152
<i>TVOG</i> stochastique	36 616 284	15 800 668
<i>TVOG</i> méthode 3	30 894 058	21 917 484
Ratio <i>BE</i>	99,58%	100,48%
Ratio <i>TVOG</i>	84,4%	138,7%
Fuite relative (en % de VM)	1,95%	3,1%

TABLE 6 – Approximation de la *TVOG* par la méthode 3

Bien que meilleurs qu'en méthode 2, notamment pour l'année 2021, ils ne sont toujours pas exploitables. De plus, on constate une fuite importante malgré la vérification de la martingalité.

Cela nécessite une approche plus approfondie pour améliorer les résultats. Une utilisation efficace de la méthode *PHRSS* serait un atout majeur dans le cadre du modèle *Life Cash Flows* puisqu'elle permettrait d'accélérer significativement le calcul de participation au bénéfices dans un cadre stochastique, et, combinée à la méthode de conversion des SCR en *RA*, de gagner significativement en vitesse de calcul lors de la modélisation de ce dernier dans le cadre d'IFRS 17.

Par ailleurs, la méthode *PHRSS* pourrait également être appliquée aux méthodes de calcul de *RA* par mesure de risque, quitte à utiliser plus de scénarios. En effet, un fonctionnement efficace avec, par exemple, une centaine de scénarios permettrait de gagner un facteur dix sur un lancement de mille scénarios. Il serait donc intéressant d'étudier l'évolution de l'efficacité de la méthode en fonction du nombre de scénarios dans le jeu réduit.

Conclusion

Solvabilité 2 et IFRS 17 sont deux normes complexes qui posent une forte charge sur les assureurs de nombreux pays. La quantité de calculs imposée, les délais de remise de rapports et la lourdeur du processus pour se conformer à la réglementation nécessitent des modèles de calcul performants afin de répondre aux exigences demandées. La nécessité pour de nombreuses entreprises de répondre simultanément aux deux normes accroît cette difficulté.

La bibliothèque *Life Cash Flows* permet de s'adapter à cette diversité et cette complexité en servant d'outil de mise en commun des calculs inter-normes. En effet, elle dispose d'une architecture modulaire qui lui permet de modéliser et organiser les flux de trésorerie de manière souple et à une maille fine de sorte à ce que ceux-ci alimentent ensuite divers modèles fonctionnant tant dans le cadre de Solvabilité 2 que d'IFRS 17.

Ainsi, bien que déterministe et modélisant uniquement du passif, elle peut alimenter une solution ALM qui générera la partie des flux dépendant de l'actif et éventuellement stochastique. Elle est également capable de modéliser une provision mathématique compatibles avec les normes locales des pays internationaux. La bibliothèque peut également alimenter une solution IFRS 17, soit directement via ses flux déterministes, soit en les faisant transiter par le modèle ALM afin d'obtenir une revalorisation dépendante de l'actif, comme pour la participation aux bénéfices. Dans la poursuite de l'objectif de réduction des temps de calculs par leur mise en commun au sein des normes, la modélisation de *Risk Adjustment* au sein de la solution IFRS 17 a été étudiée, et les méthodes de conversion de SCR Solvabilité 2 en *RA* sont des pistes intéressantes.

Par ailleurs, la bibliothèque bénéficie d'une optimisation modèle et informatique qui parallélise les calculs sur les lignes des portefeuilles, ce qui permet une réduction du temps d'exécution d'un facteur 3,8 pour de grands portefeuilles.

De plus, lorsque les flux doivent être connus à pas mensuel, la bibliothèque permet d'effectuer des lancements à pas annuels et d'approcher ces flux via une adaptation de la formule de Woolhouse. Cependant, l'exactitude de l'approximation se dégrade exponentiellement avec l'âge des assurés : 3% à quatre-vingt ans, 30% à cent ans, la rendant inapplicable aux âges élevés.

Enfin, l'application de la méthode *PHRSS* pour modéliser les *Best Estimate* stochastiques, notamment la *TVOG*, avec des ensembles réduits de scénarios s'avère trop imprécise pour être applicable mais dispose de pistes d'amélioration à creuser.

Dans ce mémoire, les développements et optimisations effectués ont porté sur trois produits de base. Il reste désormais à poursuivre les développements pour appliquer ces méthodologies à d'autres produits, ainsi que sur les produits plus complexes qu'ils peuvent composer. De même, la capacité d'adaptation aux normes se poursuit également dans la suite des travaux avec par exemple le second pilier de S2. La bibliothèque vise à pouvoir répondre à tous les besoins dès qu'il est nécessaire de projeter des flux de trésorerie. Elle est optimisée et efficace, et peut s'adapter à n'importe quel modèle ou réglementation : il suffit de changer les hypothèses et de développer les exports.

Néanmoins, le modèle reste fondamentalement un outil de modélisation de flux de trésorerie. Dans l'objectif de répondre aux contraintes réglementaires efficacement, il serait intéressant de créer des modèles capables d'effectuer une optimisation similaire pour des notions différentes.

Un fort enjeu se situe également du côté des normes qui visent une amélioration permanente mais pour lesquelles il est un défi de trouver le meilleur compromis entre la précision et l'exhaustivité, l'applicabilité à l'ensemble des pays concernés, et la simplicité de compréhension ainsi que de calcul.

Références

- [1] Graphique Construit à partir de la source suivante : Table de mortalité Hommes 2016, Insee, estimations de population et statistiques de l'état civil ; Insee-DGFIP-Cnaf-Cnav-CCMSA, Échantillon démographique permanent.
- [2] <https://esurfi-assurance.banque-france.fr/current/collectes/reporting-prudentiel>.
- [3] <https://acpr.banque-france.fr/europe-et-international/cadre-comptable/standards-internationaux/normes-comptables-internationales-ifrs>.
- [4] <https://www.legifrance.gouv.fr/>.
- [5] *Comptabilite, chapitre 8 : Impact des normes IFRS*. Dunod.
- [6] Tachfine EL ALAMI. *Risk Adjustment : Techniques d'évaluation et adaptation des calculs Solvabilité II*. 2020.
- [7] Marielle de la salle. *How you will crash your IFRS 17 project*. 2021.
- [8] DREES. Première estimation du nombre de personnes couvertes par les organismes privés d'assurances, par risque social, 2019.
- [9] EIOPA. *Directive S2*.
- [10] A NGUS S. MACDONALD. *Encyclopedia Of Actuarial Science*. Jozef L. Teugels and Bjørn Sundt, 2004. Volume 2, pp. 631–633.
- [11] Bisous Razafindrabary. *ORSA et calcul prospectif du SCR par Machine learning*. 2021.
- [12] Pierre-Emmanuel Théron. *Ifrs 17 : le niveau d'agrégation dans la représentation comptable de l'assurance*. 2020.

Liste des figures

1	Architecture du module de temporaire décès	9
2	Provision mathématique et Coefficient d'ajustement	10
3	Alimentation de la solution IFRS 17 par la bibliothèque <i>Life Cash FLows</i>	11
4	Efficacité du cadre de distribution sur le modèle <i>Life Cash Flows</i> .	12
5	Erreur d'approximation des $\overline{np_x}$ au cours de la projection	12
6	Architecture of the term life module	14
7	Mathematical reserve and adjustment coefficient	15
8	The library <i>Life Cash FLows</i> feeds the IFRS 17 solution	16
9	Distribution scheme efficiency on <i>Life Cash Flows</i> model	17
10	$\overline{np_x}$ approximation error during projection	17
11	Les trois piliers de Solvabilité 2	22
12	Pieuvre du <i>SCR</i>	23
13	Simulations dans les Simulations	24
14	S2 : Fonctions clefs du pilier 2	25
15	Dates de reporting S2	28
16	Pays concernés par les normes IFRS	30
17	Aggrégation de contrats sous IFRS 17	31
18	S2 et IFRS 17 : Des fonctionnements différents.	38
19	Pays dans lesquels addactis est implantée	39
20	Diagramme de flux : l'assurance décès temporaire	44
21	Diagramme de flux : la rente immédiate	45
22	Diagramme de flux : la rente différée	46
23	Architecture de modèle <i>LCF</i>	49
24	Architecture du module de temporaire décès	52
25	Validation des données globale	53
26	Validation des données locales	53
27	Différentes évolutions de la provision mathématique.	57
28	Calcul rétrospective de la provision mathématique	60
29	Evolution du TME et du taux technique maximal depuis 2018 . . .	61
30	Double projection pour le calcul de la provision mathématique . . .	65
31	Provision mathématique et Coefficient d'ajustement	67
32	Méthode du <i>flexing</i>	70
33	Architecture de la PB via un taux d'indexation	72
34	Architecture de la PB via le <i>flexing</i>	74
35	Sur-modèle de génération des scénarios choqués	75
36	Alimentation de la solution IFRS 17 par la bibliothèque <i>Life Cash FLows</i>	78
37	Modélisation du <i>RA</i> par mesure de risque	83
38	SCR projeté et actualisé le long des années	86
39	Loi d'Amdahl	94

40	Loi d'Amdahl en théorie et en pratique (p=83,3%)	97
41	Efficacité du cadre de distribution sur le modèle <i>Life Cash Flows</i> .	98
42	L'hypothèse d'interpolation joue un rôle important pour les âge élevés [1]	102
43	Erreur d'approximation du facteur de rente	108
44	Erreur d'approximation du facteur de rente	108
45	Erreur d'approximation des $\overline{np_x}$ au cours de la projection	109
46	Simulations retenues de l'indice action en application de la méthode 1	114
47	Simulations construites par la méthode 2	115
48	Quelques simulations retenues par la méthode 3	117
49	Effet de l'ajustement sur deux simulations de l'indice action.	119
50	Portefeuille de marché.	120
51	Efficacité de la méthode 1 - Scénarios 2023	122
52	Reporting Solvabilité 2	135

Appendice

A Reporting Solvabilité 2

Les abréviations suivantes sont utilisés :

- A, Q, S, G : annuel, trimestriel, solo, groupe
- TCB : Third County Branch
- FS : Stabilité financière
- ECB : ECB
- SPV : Special Purpose Vehicles
- EP : Etats publiques

Template Code	Template Title					TCB		TCB			TCB		SPV		EP		
		AS	QS	AQ	QG	A	Q	A	Q	Q	AS	QS	A	Q	A	AS	AG
S.01.01	Content of the submission	X	X	X	X	X	X	X	X	X							
S.01.02	Basic Information - General	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
S.01.03	Basic Information - RFF and matching adjustment portfolios	X		X		X					X		X				
S.02.01	Balance sheet	X	X	X	X	X	X		X							X	X
S.02.02	Liabilities by currency	X		X		X					X		X				
S.02.03	Additional branch balance sheet information					X							X				
S.03.01	Off-balance sheet items - general	X		X		X					X		X				
S.04.02	Information on class 10 in Part A of Annex I of Solvency II Directive, excluding carrier's liability	X									X						
S.04.03	Basic Information - list of underwriting entities	X									X						
S.04.04	Activity by country - location of underwriting	X									X						
S.04.05	Activity by country - location of risk	X									X					X	
S.05.01	Premiums, claims and expenses by line of business	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X	X		X	X
S.05.02	Premiums, claims and expenses by country			X													X
S.06.02	List of assets	X	X	X	X	X	X		X								
S.06.03	Collective investment undertakings - look-through approach	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X			
S.06.04	Climate change-related risks to investments	X				X					X		X				
S.07.01	Structured products	X		X		X					X		X				
S.08.01	Open derivatives	X	X	X	X	X	X				X	X	X	X			
S.09.01	Income/gains and losses in the period	X		X		X					X		X				
S.10.01	Securities lending and repos	X		X		X					X		X				
S.11.01	Assets held as collateral	X		X		X					X		X				
S.12.01	Life and Health SLT Technical Provisions	X	X			X	X				X	X	X	X		X	
S.12.02	Life and Health SLT Technical Provisions - by country	X				X					X		X				
S.13.01	Projection of future gross cash flows	X				X					X		X				
S.14.01	Life obligations analysis	X				X					X		X				
S.14.02	Non-Life obligation analysis	X				X					X		X				
S.14.03	Cyber underwriting risk	X				X					X		X				
S.14.04	Liquidity risk for life business								X	X							
S.14.05	Liquidity risk for non-life business								X	X							
S.16.01	Information on annuities stemming from Non-Life Insurance obligations	X				X					X		X				
S.17.01	Non-Life Technical Provisions	X	X			X	X				X		X			X	
S.17.03	Non-Life Technical Provisions - By country	X				X					X		X				

S.18.01	Projection of future cash flows (Best Estimate - Non Life)	X				X				X	X							
S.19.01	Non-life insurance claims	X				X				X	X							X
S.20.01	Development of the distribution of the claims incurred	X				X				X	X							
S.21.01	Loss distribution risk profile	X				X				X	X							
S.21.02	Underwriting risks non-life	X				X				X	X							
S.21.03	Non-life distribution of underwriting risks - by sum insured	X				X				X	X							
S.22.01	Impact of long-term guarantees measures and transitionals	X	X			X				X	X							X X
S.22.04	Information on the transitional on interest rates calculation	X				X				X	X							
S.22.05	Overall calculation of the transitional on technical provisions	X				X				X	X							
S.22.06	Best estimate subject to volatility adjustment by country and currency	X				X				X	X							
S.23.01	Own funds	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
S.23.02	Detailed information by tiers on own funds	X	X							X								
S.23.03	Annual movements on own funds	X	X	X						X	X							
S.23.04	List of items on own funds	X	X							X								
S.24.01	Participations held	X				X				X	X							
S.25.01	Solvency Capital Requirement - for undertakings on Standard Formula	X	X	X						X	X							X X
S.25.04	Solvency Capital Requirement [Financial Stability]						X	X	X									
S.25.05	Solvency Capital Requirement - for undertakings using an internal model (partial or full)	X	X	X						X	X							X X
S.26.01	Solvency Capital Requirement - Market risk	X	X	X						X	X							
S.26.02	Solvency Capital Requirement - Counterparty default risk	X	X	X						X	X							
S.26.03	Solvency Capital Requirement - Life underwriting risk	X	X	X						X	X							
S.26.04	Solvency Capital Requirement - Health underwriting risk	X	X	X						X	X							
S.26.05	Solvency Capital Requirement - Non-Life underwriting risk	X	X	X						X	X							
S.26.06	Solvency Capital Requirement - Operational risk	X	X	X						X	X							
S.26.07	Solvency Capital Requirement - Simplifications	X	X	X						X	X							
S.26.08	Solvency Capital Requirement - for undertakings using an internal model (partial or full)	X	X	X						X	X							
S.26.09	Internal model: Market and Credit risk - for financial instruments	X	X	X						X	X							
S.26.10	Internal model - Credit event risk Portfolio view details	X	X	X						X	X							
S.26.11	Internal model - Credit risk details for financial instruments	X	X	X						X	X							
S.26.12	Internal model - Credit risk Non-Financial Instruments	X	X	X						X	X							
S.26.13	Internal model - Non-life & Health NSLT Underwriting risk	X	X	X						X	X							
S.26.14	Internal model - Life and Health underwriting risk	X	X	X						X	X							
S.26.15	Internal model - Operational risk	X	X	X						X	X							
S.26.16	Internal model - Model Changes	X	X	X						X	X							

S.27.01	Solvency Capital Requirement - Non-life and Health catastrophe risk	X	X	X				X	X					
S.28.01	Minimum Capital Requirement - Only life or only non-life insurance or reinsurance activity	X	X		X	X		X	X	X	X		X	
S.28.02	Minimum Capital Requirement - Both life and non-life insurance activity	X	X		X	X		X	X	X	X		X	
S.29.01	Excess of Assets over Liabilities	X			X			X	X					
S.29.02	Excess of Assets over Liabilities - explained by investments and financial liabilities	X			X			X	X					
S.29.03	Excess of Assets over Liabilities - explained by technical provisions	X			X			X	X					
S.29.04	Detailed analysis per period - Technical flows versus Technical provisions	X			X			X	X					
S.30.01	Facultative covers for non-life and life business basic data	X			X			X	X					
S.30.02	Facultative covers for non-life and life business shares data	X			X			X	X					
S.30.03	Outgoing Reinsurance Program basic data	X			X			X	X					
S.30.04	Outgoing Reinsurance Program shares data	X			X			X	X					
S.31.01	Share of reinsurers (including Finite Reinsurance and SPV's)	X	X		X			X	X					
S.31.02	Special Purpose Vehicles	X	X		X			X	X					
S.32.01	Undertakings in the scope of the group		X											X
S.33.01	Insurance and Reinsurance individual requirements		X											
S.34.01	Other regulated and non-regulated financial undertakings including insurance holding companies and mixed financial holding company individual requirements		X											
S.35.01	Contribution to group Technical Provisions		X											
S.36.01	IGT - Equity-type transactions, debt and asset transfer	X	X					X						
S.36.02	IGT - Derivatives	X	X					X						
S.36.06	IGT - Off-balance sheet and contingent liabilities	X	X					X						
S.36.07	IGT - Insurance and Reinsurance	X	X					X						
S.36.05	IGT - P&L	X	X					X						
S.37.01	Risk concentration – Exposure to Counterparties		X											
S.37.02	Risk Concentration – Exposure by currency, sector, country		X											
S.37.03	Risk Concentration – Exposure by asset class and rating		X											
S.38.01	Duration of technical provisions						X	X	X					
S.39.01	Profit and Loss						X	X	X					
S.41.01	Lapses						X	X	X					
S.52.01	PEPP and PEPP saver information	X			X			X	X					

SR.01.01	Content of the submission [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.02.01	Balance sheet [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.12.01	Life and Health SLT Technical Provisions [RFF/MP/RM]	X		X					X	X				
SR.17.01	Non-Life Technical Provisions [RFF/MP/RM]	X		X					X	X				
SR.22.02	Projection of future cash flows (Best Estimate - Matching portfolios) [RFF/MP/RM]	X		X					X	X				
SR.22.03	Information on the matching adjustment calculation [RFF/MP/RM]	X		X					X	X				
SR.25.01	Solvency Capital Requirement - for undertakings on Standard Formula [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.25.05	Solvency Capital Requirement - for undertakings using an internal model (partial or full) [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.01	Solvency Capital Requirement - Market risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.02	Solvency Capital Requirement - Counterparty default risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.03	Solvency Capital Requirement - Life underwriting risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.04	Solvency Capital Requirement - Health underwriting risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.05	Solvency Capital Requirement - Non-Life underwriting risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.06	Solvency Capital Requirement - Operational risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.07	Solvency Capital Requirement - Simplifications [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SR.26.08	Solvency Capital Requirement - for undertakings using an internal model	X	X	X					X	X				
SR.27.01	Solvency Capital Requirement - Non-life and Health catastrophe risk [RFF/MP/RM]	X	X	X					X	X				
SE.01.01	Content of the submission [ECB add-on]								X	X	X	X		
SE.02.01	Balance sheet [ECB add-on]								X	X	X	X		
SE.06.02	List of assets [ECB add-on]								X	X	X	X		
SE.17.01	Non-Life Technical Provisions [ECB add-on]								X	X				
E.01.01	Deposits to cedants - line-by-line reporting [ECB add-on]								X	X	X	X		
E.02.01	Pension entitlements [ECB add-on]								X	X				
E.04.01	Investment revenues and expenses (part of TP and excess of assets over liabilities)								X	X	X	X		
SPV.01.01	Content of the submission [SPV]													X
SPV.01.02	Basic Information [SPV]													X
SPV.02.01	Balance sheet [SPV]													X
SPV.02.02	Off-balance sheet items and obligations [SPV]													X
SPV.03.01	Assets held for separable risk [SPV]													X
SPV.03.02	Amount of the debt or other financing mechanism issued for arrangement [SPV]													X
T.99.01	Technical table	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

FIGURE 52 – Reporting Solvabilité 2