Générateur de Scénarios Économiques (GSE)

Nexialog Consulting, Paris, France

26 novembre 2025

Abstract

Cette note propose une analyse complète des Générateurs de Scénarios Économiques (GSE), de leur rôle majeur dans la modélisation et l'évaluation des risques en assurance, ainsi que des exigences réglementaires qui les encadrent. Elle retrace également l'évolution des méthodes de modélisation pour mieux comprendre leur place actuelle dans le dispositif prudentiel. Nous y présentons les attentes des autorités de supervision et soulignons l'importance des GSE dans les calculs réglementaires et stratégiques. Les tests de validation, les éléments de gouvernance, ainsi que la documentation nécessaire pour garantir une utilisation fiable et maîtrisée sont également détaillés. Enfin, une comparaison des principaux GSE du marché met en lumière leurs points forts, leurs limites, et les critères déterminants permettant de choisir la solution la plus adaptée aux besoins spécifiques des organismes assureurs.

Keywords — GSE, Solvabilite II, IFRS 17, ALM, validation, risque neutre, monde reel, scenarios économiques

Summary

Introduction **3**

0.1 Évolution des générateurs de scénarios économiques (GSE) 3

1 Distinction entre un GSE "monde réel" et un GSE en mesure "risque-neutre" **5**

1.1 GSE en monde réel (Real-World ESG) 5

1.2 GSE risque-neutre (Market-Consistent ESG) 5

2 Exigences réglementaires : impacts sur le bilan économique d'un assureur et place des GSE dans les calculs réglementaires **6**

2.1 Modèle ALM (Asset Liability Management) 6

2.2 Solvabilité II et les exigences qui en découlent sur les GSE 7

2.2.1 Provisions Techniques sous Solvabilité II et place des GSE (Pilier I) 8

2.2.2 Fonds Propres économiques sous Solvabilité II (Pilier I) 9

2.2.3 Rapports ORSA (Pilier II) 13

2.3 IFRS 17 et les exigences sur les GSE 14

2.4 Autres cadres et recommandations 15

3 Exigences relatives à l'utilisation des GSE comme outils de prise de décision : tests de validation, gouvernance, documentation **16**

3.1 Tests de validation 16

3.1.1 GSE monde réel 16

3.1.2 GSE risque neutre 17

3.1.3 Analyse de la convergence, stress tests et études de la génération de nombre aléatoires 18

3.2 Documentation et traçabilité 18

3.3 Gouvernance du modèle 18

4 Benchmark des outils en place **19**

Conclusion **20**

References **23**

Introduction

Un Générateur de Scénarios Economiques (GSE) est un ensemble d'outils permettant de simuler de manière aléatoire l'évolution future de variables économiques et financières (taux d'intérêt, actions, inflation, spreads de crédit, etc.) sur un horizon et une granularité donné. Autrement dit, il produit de nombreux scénarios possibles de marchés, scénarios qui influencent la valeur des actifs et passifs du bilan d'une compagnie d'assurance. Ces GSE sont largement utilisés par les assureurs pour diverses applications : le pilotage technique, la gestion des risques, l'allocation dynamique et la production d'indicateurs ALM.

Historiquement, les GSE utilisés en assurance reposent sur des approches statistiques et sur des modèles de diffusion issus des mathématiques financières. Chaque facteur de risque y est représenté par un processus probabiliste, dont les paramètres sont soit estimés à partir de données historiques (GSE en monde réel), soit calibrés sur les prix de marché (GSE en risque neutre). Même si certains assureurs développent leurs propres solutions internes, une étude menée en 2020 par l'ACPR (ACPR (2020)) auprès de 15 organismes français montre que la majorité s'appuie sur des fournisseurs externes : près de 80% des GSE utilisés proviennent de sociétés spécialisées.

L'usage des GSE s'est progressivement imposé dans l'assurance, notamment depuis l'entrée en vigueur de Solvabilité II, qui exige une vision plus économique et probabiliste de la gestion des risques et de l'évaluation des passifs. Les cadres réglementaires européens et internationaux, tels que Solvabilité II ou IFRS 17, ont largement contribué à la diffusion et à l'utilisation systématique des GSE. Compte tenu de leur rôle central en assurance et de leur complexité croissante, ces outils sont désormais soumis à des exigences strictes en matière de gouvernance, de documentation, de suivi et de tests de validité.

Ce document débutera par un rappel historique de la modélisation actuarielle et de l'émergence des GSE. Nous préciserons ensuite la distinction essentielle entre scénarios en monde réel et en mesure risque neutre. Une section sera consacrée à la place qu'occupent désormais les GSE dans les cadres réglementaires récents. La troisième partie abordera les exigences méthodologiques associées, ainsi que les différentes catégories de scénarios qu'ils permettent de générer. Enfin, nous terminerons par une comparaison des outils de la place utilisés dans le secteur de l'assurance.

0.1 Évolution des générateurs de scénarios économiques (GSE)

L'évolution des générateurs de scénarios économiques (GSE) s'inscrit dans une trajectoire historique où se croisent progrès scientifiques, exigences prudentielles et révolutions technologiques. À l'origine, les modèles utilisés par les compagnies d'assurance étaient déterministes, traduisant une vision unique et figée de l'avenir. Mais dès le milieu du XXe siècle, au sein des compagnies d'assurance britanniques, la diversification des placements et notamment l'augmentation marquée de l'exposition aux actions et à l'immobilier (passant de 2 % à 21 %), a fait émerger la nécessité de modèles plus complexes, capables de représenter de façon cohérente la variabilité et les relations entre les grandeurs économiques (P. Jakhria, 2018). Pour Hal Pedersen (2016), les GSE sont le résultat de trois développements majeurs et indépendants, à savoir des avancées considérables dans la puissance de calcul, la fin du système de Bretton-Woods et le crash de 1973-74.

L'introduction, dans les années 1970, des théories financières modernes, en particulier le modèle d'évaluation des options de Black et Scholes (1973) et les travaux de Merton sur la dynamique stochastique des marchés, marque un tournant. Ces modèles ont permis de relier les fluctuations des actifs financiers à des processus probabilistes cohérents, posant les bases de la modélisation moderne des risques économiques.

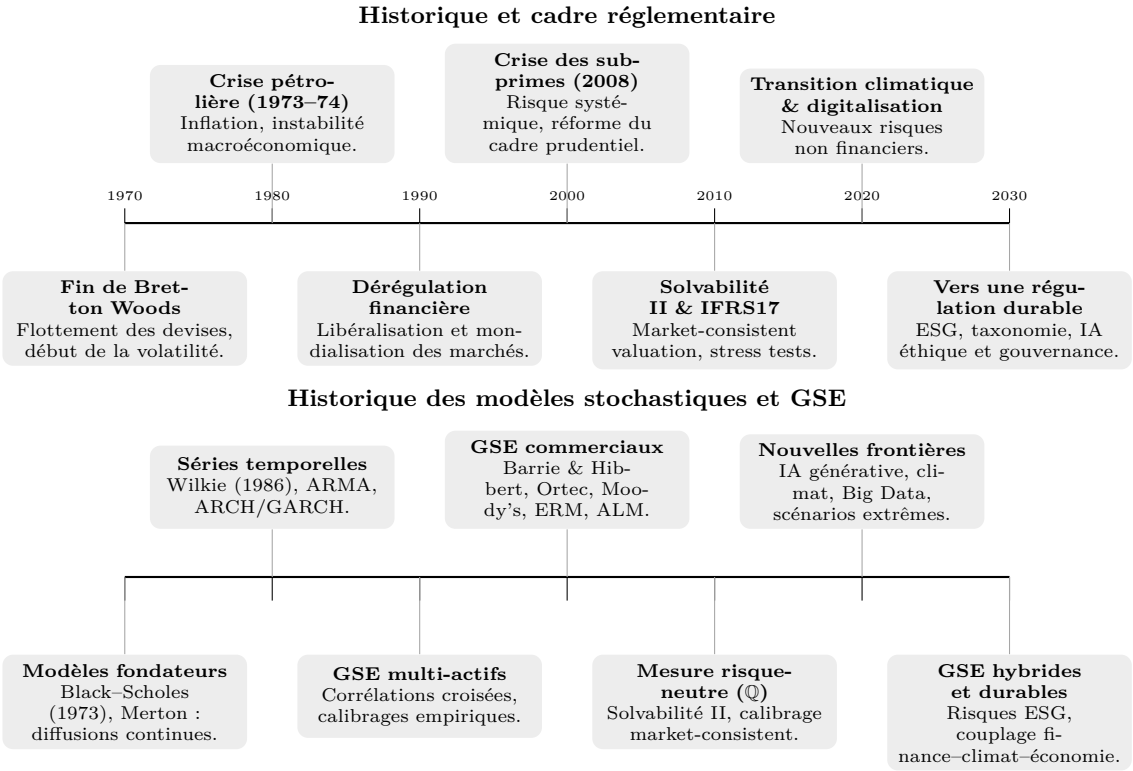

Figure 1 Double évolution des GSE : en haut, les événements économiques et réglementaires ; en bas, l'évolution des modèles stochastiques et GSE, alignée sur les périodes clés.

Dans les années 1980, des modèles de séries temporelles tels que ceux de Wilkie (1986), inspirés des processus ARMA et GARCH, ont vu le jour pour représenter de manière réaliste l'évolution conjointe des taux d'intérêt, de l'inflation et des rendements actions. Ces approches ont ensuite évolué vers des modèles structurels, intégrant des dépendances entre classes d'actifs et des mécanismes économiques de long terme comme celui de Ahlgrim.

La crise des subprimes en 2008 a marqué un tournant majeur. L'effondrement du système bancaire et la propagation du risque systémique ont mis en évidence la fragilité des modèles financiers dominants et la nécessité d'une meilleure évaluation des risques extrêmes. Cette crise a servi de catalyseur à la refonte des cadres réglementaires : Bâle III pour les banques et Solvabilité II pour les compagnies d'assurance. Ces deux réformes ont partagé une même philosophie : renforcer la résilience du système financier en exigeant une évaluation économique cohérente des risques de marché, de crédit et de liquidité, sur la base de scénarios réalistes.

Pour le monde assurantiel, Solvabilité II (entrée en vigueur en 2016) a institutionnalisé le rôle des GSE comme outils centraux du pilotage du risque. Ces modèles sont désormais mobilisés pour évaluer le capital économique requis (SCR), la solvabilité à long terme, la valeur économique des engagements (Best Estimate) et pour alimenter les stress tests ou l'ORSA. En conséquence, les GSE ont quitté la sphère purement actuarielle et financière pour devenir des dispositifs de gouvernance et de décision stratégique. La standardisation des approches, via le calibrage sous mesure risque-neutre pour la valorisation et sous mesure historique pour la projection, a favorisé l'émergence d'acteurs spécialisés (Barrie & Hibbert, Ortec, Moody's, etc.) et une homogénéisation des pratiques à l'échelle européenne et internationale.

Cependant, les régimes de taux négatifs, les discontinuités de marché et la montée des risques non financiers, qu'ils soient climatiques, technologiques ou géopolitiques, ont révélé les limites des approches classiques. Les modèles traditionnels, centrés sur les risques purement financiers, peinent à saisir les ruptures structurelles et les effets systémiques de la transition économique. Ces constats ont conduit à une nouvelle génération de GSE, plus flexibles, data-driven et capables d'intégrer des incertitudes multiples et interconnectées.

Aujourd'hui, les GSE connaissent une évolution profonde : au-delà de la sophistication des simulations, les institutions financières intègrent désormais les risques climatiques dans leurs projections. Sous l'impulsion de l'EIOPA et du NGFS, ces modèles cherchent à quantifier les impacts économiques des transitions énergétiques, des risques physiques et de transition, mais aussi les effets macro-financiers associés.

Dans ce prolongement, l'intelligence artificielle générative offre de nouvelles capacités pour la construction de scénarios économiques, en particulier dans le cadre des exercices ORSA. En exploitant des architectures d'apprentissage profond, ces modèles peuvent produire des trajectoires cohérentes mais inédites, permettant d'explorer des régimes extrêmes ou non observés historiquement. L'objectif n'est plus seulement de prédire, mais de renforcer la diversité, la plausibilité et la robustesse des scénarios utilisés pour tester la résilience du bilan assurantiel.

En somme, l'évolution des GSE reflète celle de l'actuariat, en étroite relation avec les transformations de l'économie et des risques. Aujourd'hui, les GSE s'inscrivent dans une logique de résilience durable, où réglementation, données et climat convergent pour mieux appréhender le risque à long terme.

1 Distinction entre un GSE "monde réel" et un GSE en mesure "risque-neutre"

Pour amorcer notre étude, il convient d'introduire une distinction fondamentale au sein de l'univers des générateurs de scénarios économiques (GSE). On en distingue généralement deux grandes catégories : **(i) les GSE dits « monde réel »** et **(ii) les GSE dits « risque-neutre »**. Ces deux approches poursuivent des objectifs différents et s'inscrivent dans des cadres réglementaires distincts, notamment sous Solvabilité II. De manière générale, les GSE en mesure risque-neutre sont utilisés pour la valorisation des engagements (Best Estimate) et des actifs financiers (Pricing), tandis que les GSE en monde réel servent au pilotage technique, à la gestion des risques et aux analyses de solvabilité. Dans la suite de cette étude, nous approfondirons les différences entre ces deux approches et conserverons cette distinction tout au long de la revue.

1.1 GSE en monde réel (Real-World ESG)

Sous la mesure dite « réelle » ou « historique », l'objectif est de reproduire les probabilités effectives d'occurrence des événements économiques. Le GSE en monde réel est ainsi généralement calibré à partir de données historiques, d'analyses économétriques ou encore de jugements d'experts macroéconomiques. L'enjeu est de générer des trajectoires cohérentes et plausibles, reflétant l'évolution attendue des marchés dans un cadre réaliste.

Cette approche comporte une part plus importante de subjectivité, dans la mesure où les choix de périodes historiques, les ajustements de biais ou encore les anticipations économiques sur l'avenir peuvent influencer significativement les résultats. Dans cette configuration, les actifs risqués offrent une prime de risque, ce qui rend difficile la réalisation d'une évaluation correcte.

Cette approche répond à plusieurs cas d'utilisation. Dans le cadre du calcul du SCR par modèle interne sous Solvabilité II, elle permet de générer la distribution des pertes à un an à partir d'une mesure de probabilités réelles. Le GSE monde réel joue également un rôle central dans le dispositif ORSA, en contribuant à ses trois dimensions : (i) l'évaluation du besoin global de solvabilité, (ii) la mise en évidence des écarts entre le profil de risque propre de l'organisme et celui implicitement retenu dans la formule standard, et (iii) la vérification du respect permanent des exigences de capital (Monnery, 2014).

Le régulateur tolère une certaine flexibilité dans le calibrage monde réel, car ces projections sont réservées aux usages internes (*gestion des risques, ORSA*).

1.2 GSE risque-neutre (Market-Consistent ESG)

Dans un cadre risque-neutre, on adopte une mesure probabiliste artificielle dans laquelle l'aversion au risque est entièrement neutralisée. Par construction, sous cette mesure, l'espérance de

rendement de tout actif financier est égale au taux sans risque. En pratique, cette mesure est définie de façon à rendre les prix actualisés des actifs martingales, condition nécessaire pour assurer l'absence d'arbitrage (c'est-à-dire l'impossibilité de réaliser un gain certain sans investissement initial).

Les scénarios générés sous cette mesure sont principalement utilisés pour la valorisation financière des engagements selon une logique de marché, c'est-à-dire sous l'hypothèse d'absence d'opportunité d'arbitrage. Autrement dit, les GSE en risque neutre ne sont pas conçus pour projeter l'évolution économique réelle, mais exclusivement pour la valorisation de marché.

Le calibrage d'un GSE en mesure risque-neutre consiste à ajuster ses paramètres de manière à ce que la valorisation des instruments dérivés suffisamment liquides, sous les scénarios simulés, reproduise fidèlement les prix observés sur le marché, assurant ainsi la market consistency. Concrètement, il s'agit de faire correspondre les prix d'options (calls, puts, swaptions, caps/floors, etc.) ou, de façon équivalente, les volatilités implicites du modèle avec celles observées sur le marché. Ce calibrage peut toutefois s'avérer délicat, le choix des prix de référence, selon la date, la maturité ou la profondeur de marché influençant directement la stabilité et la cohérence du modèle.

Une fois cette cohérence de marché établie, le GSE risque-neutre devient l'outil de référence pour la valorisation des passifs d'assurance. Il intervient notamment dans le calcul du Best Estimate des provisions sous Solvabilité II, dans l'évaluation dite Market-Consistent Embedded Value (MCEV), ainsi que dans le cadre de la norme IFRS 17. Ces approches garantissent que la valorisation des engagements intègre pleinement les conditions et anticipations de marché à la date d'évaluation.

D'autre part, cette approche de calibration risque-neutre est également utilisée pour la valorisation des garanties et des produits dérivés. Elle permet notamment de tarifer les flux futurs et valoriser les options des contrats telles que les taux garantis, les clauses de participation aux bénéfices ou encore les options de rachat anticipé.

L'introduction de ces deux référentiels permet de mieux comprendre les exigences des cadres réglementaires actuels, qui reposent largement sur l'utilisation de générateurs de scénarios économiques.

2 Exigences réglementaires : impacts sur le bilan économique d'un assureur et place des GSE dans les calculs réglementaires

Les GSE occupent désormais une place centrale dans les cadres réglementaires actuels, en particulier avec Solvabilité II en Europe et la norme comptable IFRS 17 à l'international. Plusieurs autorités, telles que l'EIOPA, l'ACPR ou encore l'IAIS, émettent des recommandations précises concernant leur mise en œuvre. Les exigences réglementaires portent notamment sur la calibration des modèles, les tests de validation à réaliser et la documentation associée, afin d'assurer un usage conforme et prudentiel de ces scénarios.

2.1 Modèle ALM (Asset Liability Management)

Avant d'aborder les exigences réglementaires et la place qu'y occupent les GSE, il est indispensable de rappeler une notion clé de la modélisation du bilan des assureurs : l'ALM, pour Asset Liability Management. Cette approche regroupe l'ensemble des travaux visant à gérer de façon cohérente les actifs et les passifs de l'assureur. Au centre de cette démarche se trouve le modèle ALM, qui décrit les engagements techniques par contrat ou par gamme de produits et intègre explicitement leur interaction avec le portefeuille d'actifs. Il permet de projeter simultanément actifs et passifs sur différents horizons, du court au long terme, en tenant compte des multiples dépendances économiques, financières et comportementales qui les relient.

Le modèle ALM occupe une place essentielle dans le calcul du capital de solvabilité selon la Formule Standard ou via un Modèle Interne,. Sous Solvabilité II, les actifs doivent être valorisés à leur juste valeur de marché, tandis que les engagements au passif doivent être évalués en Best

Estimate (cf. 2.2). Concrètement, les provisions sont recalculées à chaque pas de projection en fonction de l'évolution du portefeuille d'actifs, simulée à partir de scénarios économiques. Cette projection tient compte à la fois des éléments contractuellement garantis, tels que le taux minimum garanti (TMG), et des mécanismes non garantis mais potentiellement attribués, comme la participation aux bénéfices, définie selon une stratégie de pilotage précise.

Les prestations futures sont également ajustées en appliquant des hypothèses comportementales (rachats, arbitrages, dynamique des encours) ainsi que des hypothèses biométriques telles que la mortalité. L'ensemble du dispositif : allocation d'actifs, prestations garanties ou discrétionnaires, comportements assurés, est projeté de manière conjointe, en tenant compte des interactions entre actifs et passifs afin de refléter fidèlement le fonctionnement réel du bilan assurantiel.

Enfin, la moyenne des flux de passif actualisés au taux sans risque sur l'ensemble des scénarios conduit à l'estimation en Best Estimate des provisions techniques (cf. 2.2.1).

2.2 Solvabilité II et les exigences qui en découlent sur les GSE

Solvabilité II est une réforme réglementaire européenne visant le secteur de l'assurance. Inspirée de Bâle II, elle a pour ambition d'ajuster plus précisément les exigences en capital des compagnies d'assurance et de réassurance en fonction des risques qu'elles portent. Entrée en vigueur le 1 janvier 2016 en remplacement de Solvabilité I, sa mise en place a été accélérée par la crise des subprimes.

Cette directive instaure un cadre harmonisé de solvabilité et de supervision pour les acteurs de l'assurance au sein de l'Union Européenne. Elle s'articule autour de trois piliers :

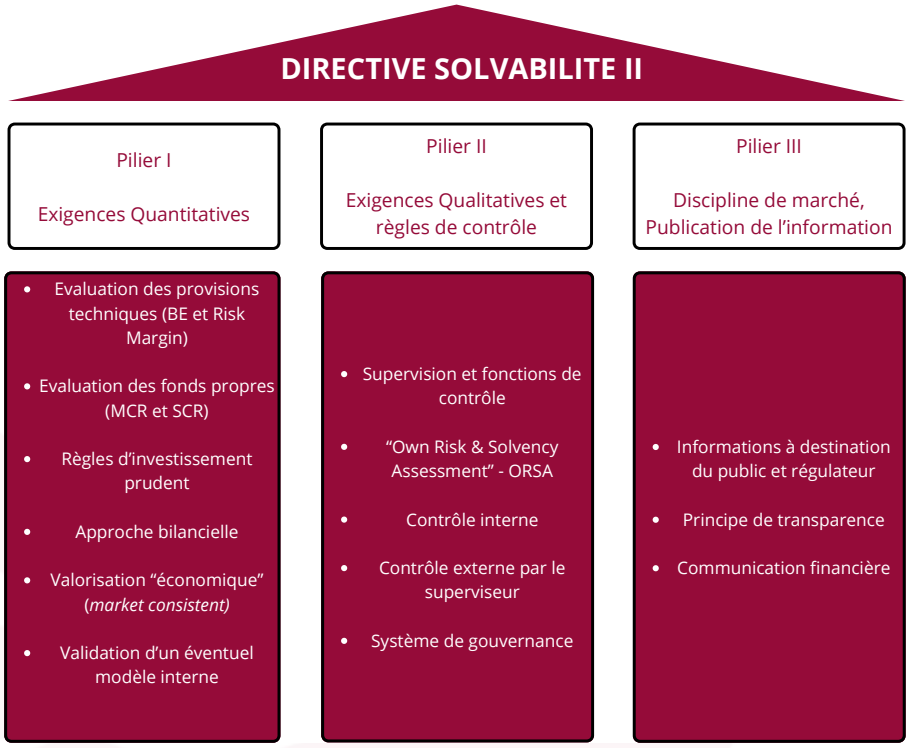

Figure 2 Les piliers de Solvabilité II

— **Pilier I exigences quantitatives** : définir les normes quantitatives de calcul des provisions techniques (BE et Risk Margin) et des fonds propres (MCR et SCR).
— **Pilier II** : exigences qualitatives portant sur la gouvernance, la gestion des risques et le processus d'évaluation interne des risques et de la solvabilité (ORSA). L'un des objectifs est l'identification des sociétés "les plus risquées", envers lesquelles les régulateurs auront la possibilité de réclamer un capital plus élevé que celui suggéré par le calcul du SCR et/ou de réduire leur exposition aux risques.

— **Pilier III** : exigences de transparence et de reporting envers les autorités de supervision et le public. Les piliers I et II n'auraient que très peu de valeur si aucune communication sur eux n'était faite aux assurés, concurrents, agences de notation ...

Pour bien saisir les changements qu'impose Solvabilité II, il nous faut comparer sa vision du bilan d'un assureur avec celui de Solvabilité I :

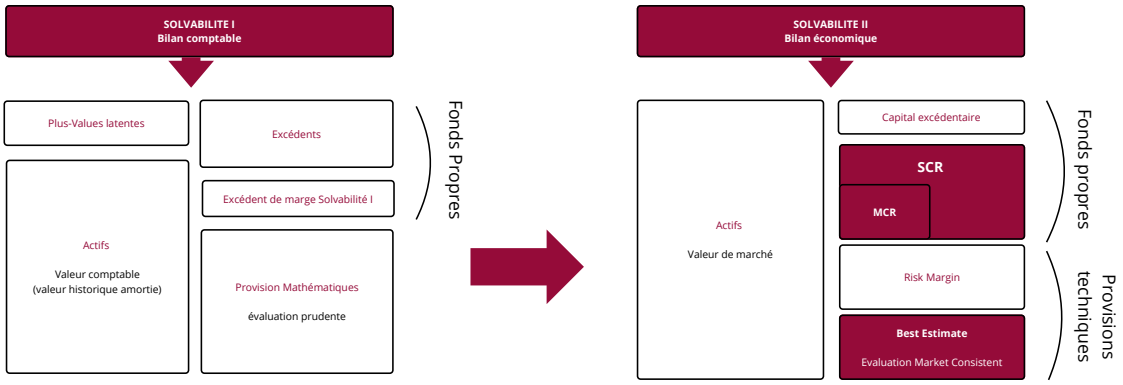

Figure 3 Le nouveau bilan économique sous Solvabilité II

La principale différence visible dans le bilan 3 réside dans l'approche d'évaluation : sous Solvabilité I, les postes du bilan sont valorisés de manière prudente selon les règles comptables françaises, tandis que Solvabilité II adopte une vision économique avec une valorisation market consistent. Cette approche renforce la transparence sur le niveau réel de solvabilité de l'organisme.

Ce bilan constitue la base des calculs du SCR, que ce soit via la Formule Standard ou un Modèle Interne. De plus, ce bilan est également utilisé pour déterminer la MCEV (Market Consistent Embedded Value) et la New Business Value, deux indicateurs visant à mesurer la capacité économique du portefeuille à générer des bénéfices futurs.

2.2.1 Provisions Techniques sous Solvabilité II et place des GSE (Pilier I)

Comme indiqué plus tôt, les actifs sont valorisés à leur juste valeur de marché à la date de clôture du bilan (en Mark-to-Market, ou en Mark-to-Model lorsque les données ne sont pas directement observables sur le marché).

Pour les provisions techniques, l'évaluation n'est plus fondée sur une approche prudente, mais sur une vision économique. Les engagements sont alors calculés comme la somme de deux éléments :

— **Le Best Estimate (BE)** représente la valeur actuelle attendue des engagements futurs de l'assureur (prestations, frais, commissions, primes). Il correspond ainsi à la meilleure estimation possible de leur valeur économique à la date d'évaluation.

— **La Risk Margin (RM)** correspond au supplément de provision ajouté au Best Estimate afin que le montant total des provisions reflète ce qu'exigerait une entité tierce pour reprendre et couvrir les engagements de l'assureur.

  En pratique (voir Addactis (2022)), son évaluation repose sur le calcul des SCR futurs avec un GSE (voir 2.2.2) pour les modules de risques Vie, Non-Vie, quantitatifs, opérationnels et de défaut, et ce jusqu'à extinction du portefeuille. Sa formule, précisée dans l'article 37 du règlement délégué, est :

$$\mathrm{RM} = CoC * \sum_{t \geq 0} \frac{\mathrm{SCR}_{\mathrm{Ru}(t)}}{\left(1 + r_{t+1}\right)^{t+1}}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathrm{SCR}_{\mathrm{Ru}} &= \text{SCR calculé sur les modules de risques sélectionnés,} \\ r_{t+1} &= \text{le taux sans risque à l'instant } t+1, \\ CoC &= \text{le coût du capital.} \end{aligned}$$

Le GSE dans le calcul du Best Estimate La valorisation market-consistent des engagements d'assurance implique que le Best Estimate soit déterminé comme l'espérance neutre au risque des flux futurs, actualisés à l'aide des taux sans risque appropriés.

Mathématiquement, le Best Estimate peut s'écrire :

$$BE_0 \;=\; \mathbb{E}^Q\left[\sum_{i=1}^{N} \frac{\text{Cashflow}_{t_i}}{\left(1+r_{t_i}\right)^{t_i}}\right].$$

Le Best Estimate peut être calculé selon deux méthodes. La première, déterministe, ne requiert pas l'utilisation d'un générateur de scénarios économiques. La seconde, stochastique, s'appuie sur un GSE en mesure risque-neutre afin de simuler les variables nécessaires à l'évaluation du BE.

Dans ce cadre, un Best Estimate est calculé pour chacun des K scénarios (souvent de l'ordre de 1 000 en pratique). L'espérance de la formule précédente peut alors être estimée par une approximation de Monte-Carlo comme suit :

$$\widehat{BE}_0 \;=\; \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K} BE^{(j)} \;=\; \frac{1}{K}\sum_{j=1}^{K}\sum_{i=1}^{N} \frac{\text{Cashflow}_{t_i}^{(j)}}{\left(1+r_{t_i}^{(j)}\right)^{t_i}}.$$

La figure 4 schématise le calcul du BE, mettant en avant la place du GSE risque neutre.

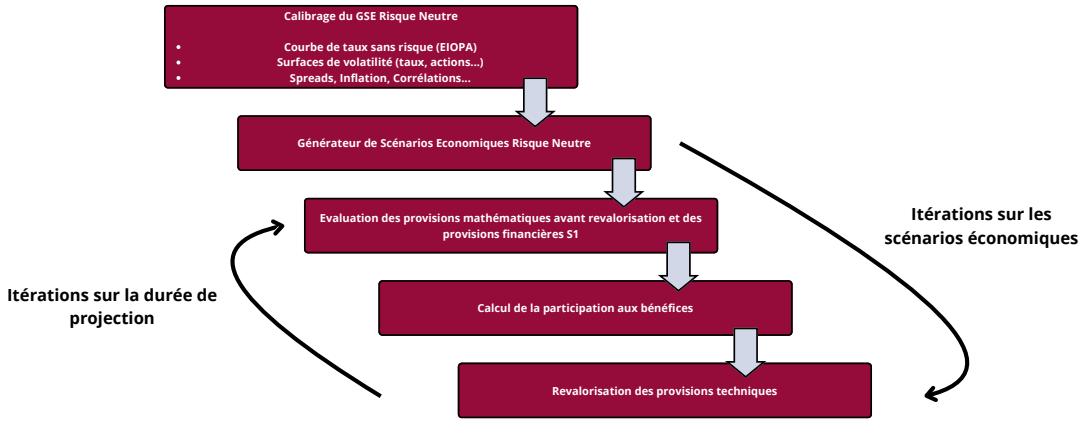

Figure 4 Cadre de calul du BE sous Solvabilité II et place du GSE risque neutre

Le considérant 15 du Règlement Délégué (UE) 2015/35, comme mentionné dans ACPR (2020), précise d'ailleurs que pour certains contrats vie (avec participation aux bénéfices, options financières, etc.), l'usage de méthodes stochastiques (donc de GSE) fournit une évaluation plus appropriée de la Best Estimate. Outre sa place centrale dans le calcul des provisions techniques, le Best Estimate a un rôle majeur dans le calcul du SCR.

2.2.2 Fonds Propres économiques sous Solvabilité II (Pilier I)

Minimum Capital Requirement (MCR) Le MCR correspond au niveau minimal de fonds propres de base admissibles en-dessous duquel une entreprise d'assurance ou de réassurance ne peut plus poursuivre son activité sans exposer ses assurés à un risque jugé inacceptable. Son calcul se décompose en trois étapes, notamment détaillées par Rattaz (2017) :

— **MCR linéaire** : obtenu à partir d'une combinaison linéaire de deux composantes : une partie non-vie (fondée sur les Best Estimates et les primes par ligne d'activité) et une partie vie (basée sur une combinaison linéaire des provisions techniques par type de contrat et des capitaux sous risque).

— **MCR combiné** : applique au résultat du calcul précédent une contrainte pour le ramener entre 25% et 45% du SCR

— **Détermination finale du MCR** : le montant obtenu est enfin comparé à une valeur plancher, le MCR absolu (AMCR), ce qui donne :

$$MCR = \min\left(AMCR, \text{MCR combiné}\right)$$

Solvency Capital Requirement (SCR) Le SCR constitue l'indicateur central du niveau de fonds propres requis. Il représente le capital cible nécessaire pour qu'une compagnie puisse absorber des pertes extrêmes et éviter la ruine économique sur un horizon d'un an, avec un niveau de confiance de 99,5%. C'est notamment à travers son calcul que le générateur de scénarios économiques joue un rôle essentiel dans le Pilier I de Solvabilité II.

La définition probabiliste du SCR s'écrit :

$$P(\text{NAV}_1 \leq \text{VaR}_{0.5\%}) = 0.5\% \tag{1}$$

où la **NAV** (Net Asset Value) représente la valeur économique nette de l'entreprise, définie comme la différence entre la valeur de marché des actifs et celle des engagements. Le SCR peut ainsi être interprété comme une **Value-at-Risk (VaR)** appliquée à l'évolution de la NAV sur un an.

— NAV_0 : fonds propres économiques à l'instant $t = 0$,
— NAV_1 : fonds propres économiques projetés à l'horizon d'un an en risque neutre.

Deux voies principales sont prévues par Solvabilité II pour le calcul du SCR :
— la Formule Standard, approche prescrite par l'EIOPA
— le Modèle Interne, approuvé par le superviseur

La figure 5 simplifie la différence majeure entre les deux approches,

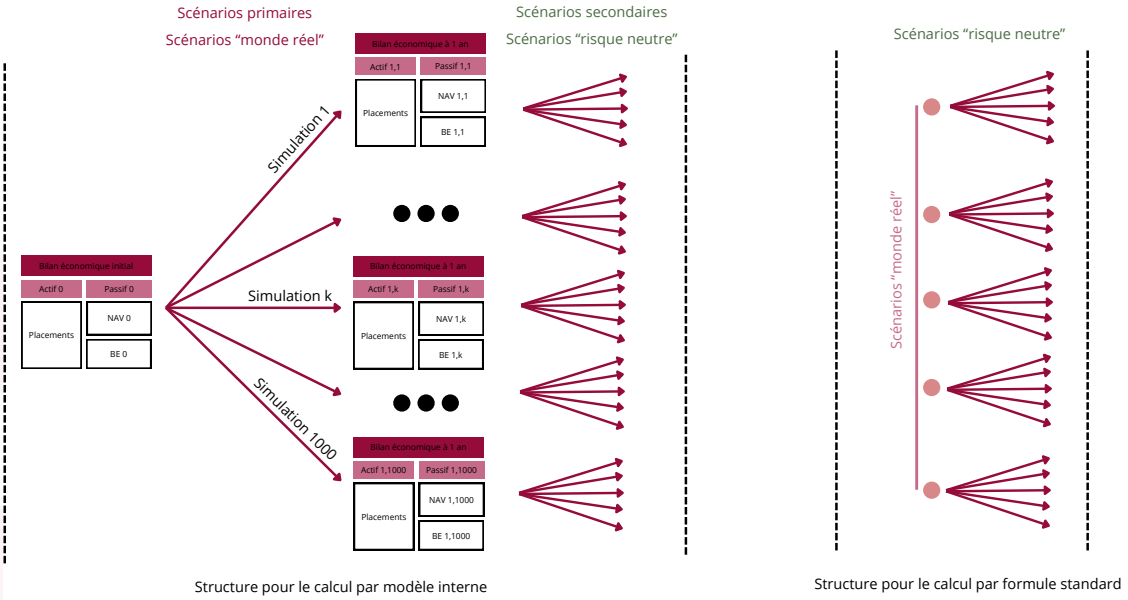

Figure 5 La différente structure de calcul selon la méthode de détermination du SCR

Approche par Formule Standard pour le calcul du SCR Cette approche factorielle simplifiée est relativement simple à mettre en œeuvre, et se base sur la cartographie des risques de la compagnie 6 :

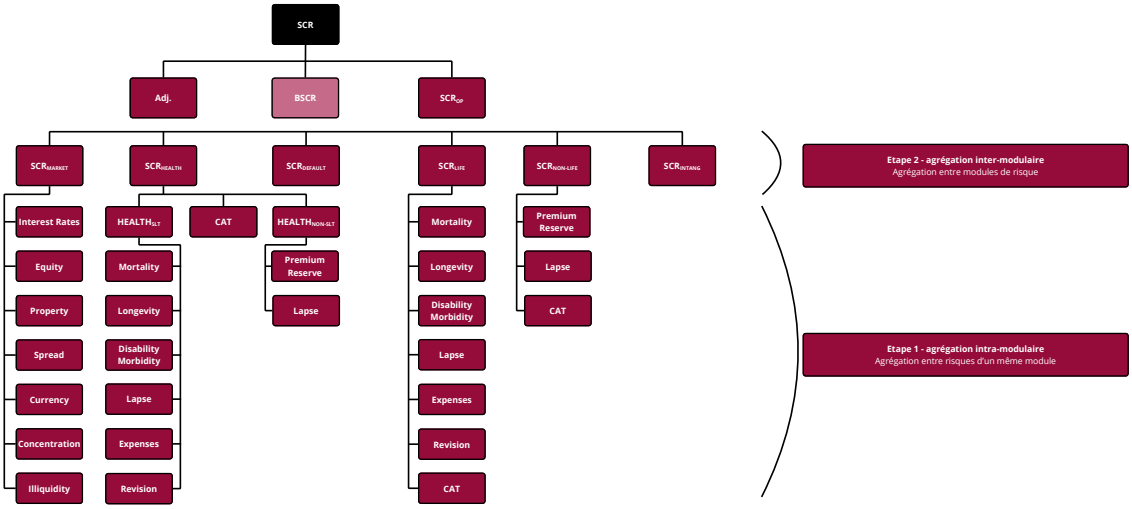

Figure 6 Cartographie des risques sous Solvabilité II

Cette structure en arbre s'explique par le fait que le SCR provient de sous-montants réglementaires liés à chaque branche d'activité. L'approche de la formule suivante est donc la suivante :

$$\text{SCR} = \text{BSCR} - \text{SCR}_{\text{Opérationnel}} - \text{Ajustements}.$$

avec :

— $BSCR$: appelé également SCR de base, il correspond au capital requis pour couvrir les principaux risques assurantiels et financiers,

— $\text{SCR}_{\text{Opérationnel}}$: le capital requis au titre du risque opérationnel,

— Les ajustements : ils reflètent la capacité d'absorption des pertes par les assurés (par exemple via la participation aux bénéfices) ainsi que par les impôts différés.

Elle repose sur l'hypothèse d'une dépendance gaussienne entre les facteurs de risque, ce qui implique une relation linéaire entre ces derniers et les fonds propres économiques. Dans le cas de l'assurance-vie, le calcul du SCR via la Formule Standard nécessite l'utilisation d'un modèle ALM afin d'appliquer des chocs directement sur les actifs et passifs du bilan.

Les principales étapes de calcul sont les suivantes :

— À partir d'un GSE en risque neutre, un bilan central est d'abord évalué, puis un *choc instantané* est appliqué sur chaque type de risque (actions, taux, crédit, etc.), calibré pour représenter un événement extrême au quantile 99,5,

— Le SCR associé à un risque R est obtenu en mesurant la baisse des fonds propres entre le scénario central et le scénario choqué :

$$\widehat{SCR}_R = \widehat{NAV}(0) - \widehat{NAV}_R(0).$$

— Enfin, les SCR par risque (marché, souscription, contrepartie, opérationnel, etc.) sont agrégés à l'aide de la matrice de corrélation réglementaire afin d'obtenir le SCR global.

Une approche visuelle simplifiée 7 permet d'apprécier l'effet d'un choc sur le bilan économique d'un assureur.

Approche par modèle interne pour le calcul du SCR Plus souple mais également plus exigeante que la Formule Standard, l'approche par modèle interne est considérée comme l'une des méthodes les plus alignées avec l'esprit de Solvabilité II. Son utilisation nécessite cependant une validation préalable par l'autorité de supervision. Le processus peut être résumé en trois grandes étapes :

— **Génération de scénarios en monde réel** : un grand nombre de scénarios économiques à un an (scénarios primaires) sont simulés sous la mesure historique $\mathbb{P}$, pondérés par leur probabilité empirique, afin d'obtenir la distribution de NAV_1.

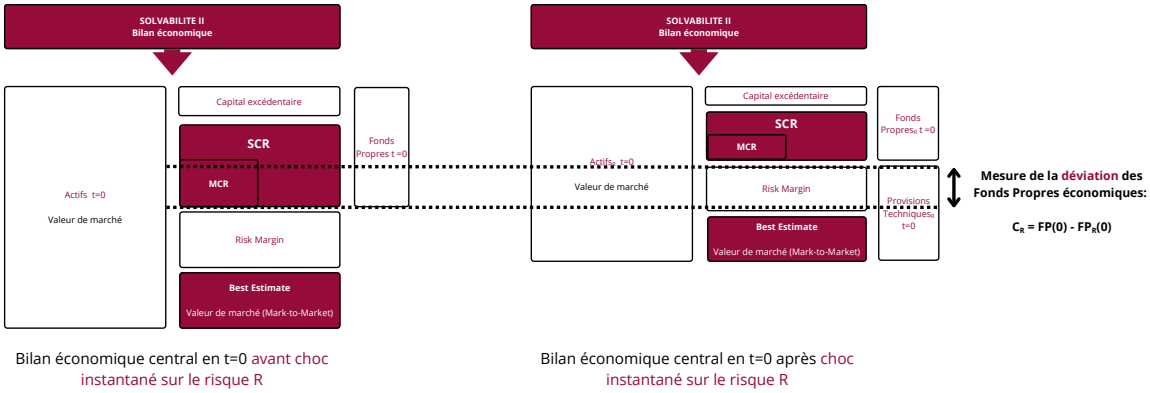

Figure 7 Simplification visuelles d'un choc sur le SCR sous Formule Standard

- **Évaluation de la richesse à horizon un an** : chaque scénario permet d'estimer les plus-values ou moins-values latentes, les défauts potentiels sur actifs, ainsi que tout événement impactant les fonds propres économiques.
- **Génération de scénarios en risque neutre** : pour valoriser les passifs sensibles aux options financières (rachats, garanties, swaptions, etc.) à la date $t = 1$, un second générateur produit des scénarios market-consistent sous mesure $\mathbb{Q}$ (scénarios secondaires) pour chacun des scénarios primaires.

Cette méthode reflète mieux les caractéristiques spécifiques de l'assureur (structure de portefeuille, interactions entre risques), mais exige un effort de calcul important : chacun des n scénarios monde réel (premier niveau) implique une valorisation sous $\mathbb{Q}$ pour les dates ultérieures (second niveau). L'ACPR s'assure que la distribution finale est assez "large" pour capturer des chocs extrêmes, et demande à l'assureur de considérer les erreurs potentielles de modélisation (biais, absence de queues épaisses, etc.).

Certaines techniques alternatives permettent de pallier ce problème de complexité calculatoire (voir Bernard (2013)) :

- **SdS accélérée** : cette approche consiste à identifier rapidement les scénarios les plus défavorables à l'aide d'indicateurs liés aux facteurs de risque, afin de limiter le nombre de valorisations nécessaires. Deux stratégies peuvent alors être mises en œuvre :
  - réduire le nombre de simulations primaires issues du GSE en monde réel,
  - réduire le nombre de simulations secondaires issues du GSE en mesure risque-neutre.
- **Replicating Portfolios** : la valeur d'un passif complexe est approchée par celle d'un portefeuille d'actifs standards (swaps, obligations, etc.) reproduisant le plus fidèlement possible les mêmes flux futurs. Cette méthode réduit fortement le temps de calcul, car la valorisation revient alors à combiner linéairement des instruments simples et directement pricables.
- **Curve Fitting** : cette approche consiste à ajuster une fonction de valorisation à partir d'un nombre limité de points de référence (par exemple quelques points de taux ou de volatilité), puis à extrapoler la valeur pour l'ensemble des scénarios. L'objectif est de privilégier la précision de l'estimation plutôt que la multiplication des valorisations individuelles.
- **Least-Squares Monte Carlo (LSMC)** : méthode dérivée des travaux de Longstaff & Schwartz (initialement développée pour les options américaines). Elle consiste à régresser les cash-flows en fonction de variables de marché (taux, indices, volatilités, etc.) afin d'obtenir un estimateur fonctionnel, souvent polynomial ou basé sur d'autres familles de fonctions. Celui-ci permet ensuite de valoriser rapidement un grand nombre de scénarios supplémentaires, en limitant le recours à des valorisations exactes. On réduit ainsi significativement le volume de calcul tout en préservant une bonne estimation de la valeur moyenne ou de la distribution recherchée.
- **Local Least-Squares Monte Carlo (LLSMC)** : variante plus avancée du LSMC classique, qui consiste à segmenter l'espace des réponses à l'aide d'un algorithme de clustering (souvent k-means), puis à ajuster des régressions locales, complétées par une régression logistique multinomiale pour estimer les probabilités d'appartenance aux clusters. Cette approche

améliore la capture des non-linéarités et des comportements extrêmes, ce qui la rend particulièrement adaptée au calcul du SCR, notamment pour l'estimation des mesures de risque en queue de distribution.

En pratique, on peut aussi recourir à un modèle interne partiel, dans lequel certains risques sont couverts par la Formule Standard et d'autres par un modèle interne. Dans tous les cas, Solvabilité II impose de documenter et justifier l'ensemble du processus (choix du GSE, calibrage, validations), afin de s'assurer que la couverture à 99,5% sur un an soit correctement évaluée.

2.2.3 Rapports ORSA (Pilier II)

Le Pilier II de Solvabilité II impose aux assureurs de réaliser une ORSA (Own Risk and Solvency Assessment, ou évaluation interne des risques et de la solvabilité) au minimum une fois par an, ainsi qu'à chaque changement stratégique majeur. Cette démarche peut être vue comme un ensemble structuré de processus permettant de constituer un outil d'aide à la décision, destiné à analyser, comprendre et évaluer les risques auxquels l'entreprise est exposée au cours de son activité.

En pratique, l'ORSA dépasse le seul Pilier II : elle est transversale à l'ensemble du cadre Solvabilité II, puisqu'elle doit également couvrir les exigences quantitatives et interpréter les principaux indicateurs issus des reportings réglementaires.

L'ORSA requiert d'analyser la capacité de l'assureur à faire face à ses risques sur un horizon de planification (3 à 5 ans généralement), en y intégrant des scénarios de stress et des analyses de sensibilité prospective. L'entreprise doit montrer qu'elle a su cartographier ses risques et qu'elle est consciente de son exposition et *in fine*, qu'elle a la capacité de se couvrir face à ces risques ou de prendre des décisions stratégiques afin de minimiser son exposition. L'article 45 de la Directive Solvabilité II (dir (2009)) dégage de l'ORSA trois exigences en matière de formalisation de l'évaluation des risques encourus par l'assureur :

— Evaluation du besoin global de solvabilité (BGS) : estimation propre à l'entité du montant de capital économique dont elle doit disposer afin de faire face aux risques encourus. Le calcul du BGS en ORSA nécessite de projeter le ratio de couverture pour divers niveaux de quantiles. Dans ce cadre, on peut utiliser une combinaison de GSE monde réel pour projeter l'évolution des variables économiques et financières sur la durée du plan stratégique, et de GSE risque neutre pour retenir des modèles robustes permettant de valoriser le Best Estimates des engagements d'assurance à long terme.
— Respect permanent de la solvabilité de l'assureur à tout moment et ce jusqu'à l'horizon de projection spécifié par le Business Plan. L'utilisation d'un GSE s'avère nécessaire pour dresser le compte de résultat et construire le bilan de l'assureur pour chaque scénario et chaque période.
— Ecart par rapport à la formule standard : l'assureur doit être en mesure d'expliciter l'écart entre le profil de risque considéré dans la formule standard et le sien effectif. Cet écart varie selon la méthode retenue pour le SCR et l'approche de l'entreprise face aux risques considérés dans l'ORSA.

Les GSE sont donc souvent mobilisés pour construire des scénarios macroéconomiques cohérents à moyen terme (scénarios de choc économique, différents cycles économiques futurs plausibles) et projeter le bilan de l'assureur sous ces scénarios adverses afin de répondre aux différents besoins de l'ORSA. Cela permet d'évaluer l'adéquation des fonds propres dans des conditions dégradées, d'identifier les facteurs de risque majeurs et d'aider à la décision stratégique (adaptation de l'allocation d'actifs, mise en place de la politique de dividendes ou définition des niveaux de taux garantis).

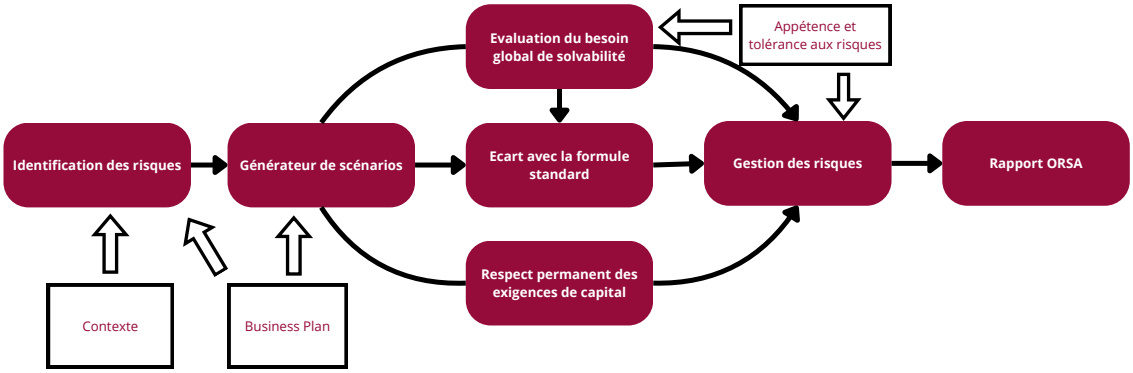

Figure 8 L'approche ORSA et la place qu'y tient le GSE

Un bon GSE doit ainsi pouvoir générer non seulement des simulations neutres au risque pour la valorisation instantanée, mais aussi des simulations réalistes pour des stress tests pluriannuels intégrés à l'ORSA. Les résultats de ces analyses doivent être reportés dans le rapport ORSA remis au superviseur et au conseil d'administration, avec explication des hypothèses économiques retenues et de la méthodologie de simulation.

2.3 IFRS 17 et les exigences sur les GSE

Bien qu'il s'agisse de deux cadres réglementaires distincts, Solvabilité II et IFRS 17 présentent de fortes similitudes. Toutes deux visent à valoriser actifs et passifs selon une approche alignée sur le marché 9. La principale différence réside dans la présence, sous IFRS 17, du Contractual Service Margin (CSM), qui permet de lisser la reconnaissance du profit au rythme de la prestation du service d'assurance. À l'inverse, dans Solvabilité II, le profit attendu au-delà de la marge pour risque est immédiatement reconnu en fonds propres.

Même si la norme IFRS 17 définit les composantes du passif (Best Estimate, ajustement pour risque, CSM), elle ne prescrit aucune méthode de calcul, laissant les assureurs interpréter et modéliser leur approche. Ainsi, plusieurs méthodes coexistent pour déterminer l'ajustement pour risque (concept distinct de la marge pour risque Solvabilité II) : approche par coût du capital, méthodes par chocs ou encore simulations stochastiques via un générateur de scénarios économiques, comme le souligne Nexialog Consulting (2021).

Enfin, le caractère market consistent du Best Estimate sous IFRS 17 requiert également l'utilisation d'un GSE. Toutefois, une nuance importante subsiste : sous IFRS 17, le BE correspond à la meilleure estimation des flux de trésorerie futurs, tandis que sous Solvabilité II, il reflète la meilleure estimation des flux comptables.

Solvabilité 2	
Actifs	**Passifs**
Actifs en valeur de marché	**Fonds Propres** Capital excédentaire SCR MCR
	Provisions techniques Marge pour risque BE

IFRS 17	
Actifs	**Passifs**
Actifs en valeur de marché	**Fonds Propres** Capitaux propres
	Provisions techniques CSM Marge pour risque BE

Figure 9 Comparaison des bilans sous Solvabilité 2 et IFRS 17

Les principes généraux d'IFRS 17 reposent sur une double exigence. La première concerne la cohérence avec le marché : la norme impose que les hypothèses financières soient alignées sur les données observables (références B42–B48). Ainsi, les taux d'actualisation doivent refléter fidèle-

ment les taux sans risque disponibles sur les marchés (cf. B74–B81), garantissant une valorisation conforme aux conditions économiques du moment.

Ensuite, la valorisation des garanties financières requiert une approche adaptée face aux options complexes, telles que les taux garantis ou les rachats anticipés. Dans ces cas, il est nécessaire d'utiliser des méthodes stochastiques ou de constituer des portefeuilles répliquants afin d'estimer la juste valeur. Un GSE calibré de façon market-consistent s'avère alors indispensable. Comme le souligne IFRS 17 et Moody's (Moody's Analytics (2023)), « One of the most flexible solutions is the use of stochastic market-consistent scenarios generated using an ESG », démontrant l'importance d'adopter des scénarios qui intègrent pleinement la dynamique du marché.

IFRS 17 n'impose pas explicitement l'utilisation de la mesure risque-neutre, mais les scénarios utilisés doivent aboutir aux mêmes valorisations que celles obtenues sur les marchés financiers, pour respecter la "market consistency". Deux voies sont possibles pour respecter la neutralité au risque :

— **GSE risque-neutre ($\mathbb{Q}$)** : la projection est réalisée directement sous une mesure neutre au risque, dans laquelle chaque actif présente un rendement espéré égal au taux sans risque. Les paramètres (volatilités, corrélations ...) sont calibrés afin de reproduire les prix observables des produits dérivés sur le marché.
— **GSE monde réel avec déflateurs** : approche moins courante, consistant à générer des trajectoires sous la mesure historique $\mathbb{P}$, puis à appliquer à chaque scénario un déflateur stochastique (Stochastic Discount Factor) afin d'éliminer la prime de risque et d'obtenir des valorisations cohérentes avec celles du marché. Cette méthode doit ensuite satisfaire plusieurs tests de validation, notamment le test de martingalité (absence d'arbitrage) et celui de *market consistency*, qui seront détaillés ultérieurement.

Le choix entre ces deux approches dépend souvent de la culture de l'assureur et de l'infrastructure de modélisation. Dans tous les cas, la "market consistency" de la valorisation (sous cette mesure ou via un déflateur) doit être démontrée.

S'il existe des caractéristiques non standard, par exemple liées à l'illiquidité ou à la complexité et qu'elles ne sont pas directement observables sur le marché, des ajustements spécifiques (tels que des spreads d'illiquidité) peuvent être appliqués. Leur utilisation doit toutefois être justifiée et documentée, afin de démontrer leur cohérence avec les principes d'IFRS 17.

2.4 Autres cadres et recommandations

Au-delà de Solvabilité II et IFRS 17, on peut mentionner les orientations de l'EIOPA et de l'IAIS.

L'EIOPA a publié des lignes directrices sur l'application des modèles internes en accord avec Solvabilité II (EIOPA-BoS-14/180) (EIOPA (2014)) qui précisent les attentes en matière de validation, de gouvernance et d'utilisation des modèles internes (donc du GSE s'il est partie prenante du modèle). Par ailleurs, Armel and Planchet (2018a) précise que les orientations de l'EIOPA présentent également un certain nombre de contraintes qu'un GSE doit satisfaire, notamment :

— pertinence des instruments financiers retenus pour la calibration par rapport aux caractéristiques des options et garanties financières proposées par l'assureur
— profondeurs, liquidité et transparence des marchés d'où proviennent les données

L'IAIS, de son côté, dans le cadre de l'Insurance Capital Standard (ICS) ou de principes de solvabilité internationaux, promeut également l'utilisation de scénarios prudents. L'IAIS insiste par exemple sur la nécessité d'une calibration appropriée aux événements extrêmes (voir IAIS (2023)). Enfin, des associations actuarielles internationales comme l'IAA ou le CRO Forum publient des études sur les bonnes pratiques de calibration des risques de marché qui sont pertinentes pour la construction des GSE (par ex. recommandations sur la volatilité implicite à utiliser, sur les corrélations en situation de crise, etc.)

Maintenant que nous avons définit la place des GSE pour les différents calculs requis par les normes européennes et internationales de régulation, nous allons nous attarder sur les différents tests et les nombreuses exigences demandés lors de la production de scénarios et de l'utilisation de ces outils comme aide à la prise de décision.

3 Exigences relatives à l'utilisation des GSE comme outils de prise de décision : tests de validation, gouvernance, documentation

Étant donné l'importance des GSE dans les évaluations financières et réglementaires, la validation et la gouvernance des GSE sont des enjeux majeurs.

Les régulateurs imposent aux assureurs de mettre en place un cadre de contrôle robuste autour de leurs modèles : cela inclut des tests statistiques variés, une gouvernance formalisée (politiques, comités, audit interne) et une documentation complète. Ils doivent définir et appliquer une politique de validation de leurs modèles internes (dont le GSE fait partie). Cette politique précise les processus, méthodes et fréquences de validation, les rôles et responsabilités (modélisateurs, valideurs indépendants, etc.), ainsi que les actions à mener en cas de résultats de validation non satisfaisants.

En France, l'ACPR (Notice Modèles Internes) insiste sur l'indépendance du processus de validation et sur la nécessité de revues régulières et d'ad hoc (suite à des modifications majeures du modèle ou à l'apparition de nouveaux risques). Le résultat de chaque campagne de validation doit être synthétisé dans un rapport de validation documentant les tests effectués et leurs conclusions.

3.1 Tests de validation

Lorsqu'un GSE est utilisé, que ce soit sous une mesure risque-neutre ou sous une mesure monde réel, l'entreprise doit être en mesure de démontrer la précision et la robustesse des calculs réalisés, ainsi que la capacité du modèle à produire des prix cohérents avec ceux observés sur les marchés financiers. Conformément à l'Orientation 58 de ACPR (2015), ces validations doivent être réalisées régulièrement, et au minimum une fois par an.

Ces tests doivent également être conduits avant et après toute modification significative du modèle, et peuvent être appliqués à différentes étapes du processus : calibration, génération de scénarios ou projection. Une distinction est par ailleurs nécessaire entre probabilité historique (monde réel) et probabilité risque-neutre, puisque leurs objectifs diffèrent. Pour garantir la qualité du processus, ACPR (2020) exige la définition de seuils de validation ainsi que de mesures correctives à appliquer en cas de dépassement.

Avant toute campagne de tests, la qualité de la donnée utilisée doit être examinée. Comme le recommande Hal Pedersen (2016), il convient d'évaluer sa précision, sa complétude et sa pertinence.

Les sections suivantes présentent différents types de tests destinés à vérifier qu'un GSE est conforme et adapté à son usage.

3.1.1 GSE monde réel

Dans le cadre d'une probabilité historique, les simulations doivent reproduire au mieux le comportement réel des marchés. La validation repose alors sur des contrôles statistiques et des analyses ex-post dépendant des facteurs de risque considérés. En pratique, le nombre important de choix méthodologiques, tant quantitatifs que qualitatifs, rend pertinent le recours à l'avis d'experts.

Lors de la calibration, la qualité d'un modèle, comme le souligne Kamega (2015), est évaluée à travers sa capacité d'ajustement. Une attention particulière doit être portée à l'analyse des résidus afin de vérifier leur normalité, l'absence d'autocorrélation et l'homoscédasticité.

Une fois les scénarios générés, leur validation consiste à confronter les résultats à l'observation du marché. À ce titre, Hal Pedersen (2016) distingue trois niveaux de tests, selon l'horizon temporel analysé :

— **Test point-in-time** : consiste à vérifier que les caractéristiques du modèle en $t = 0$ correspondent à celles observées sur le marché. Sans cette cohérence initiale, les trajectoires simulées seraient nécessairement erronées.

— **Test in-sample** : vise à confirmer que le GSE reproduit correctement les faits stylisés des données historiques. Ce test repose généralement sur :

  - une comparaison visuelle des distributions (PDF),
  - l'analyse des statistiques descriptives (moyenne, médiane, asymétrie, kurtosis),
  - une comparaison des corrélations ou des distributions bivariées.

  Il est réalisé sur l'échantillon ayant servi à la calibration du modèle.
- **Test out-of-sample** : correspond à un exercice de backtesting sur un échantillon de données non utilisé lors de la calibration. Il permet d'évaluer la robustesse du modèle, notamment sa capacité à capturer correctement les queues de distribution et les événements extrêmes observés sur les marchés.

3.1.2 GSE risque neutre

Sous mesure risque-neutre, la validation d'un GSE consiste à s'assurer que les prix obtenus sont correctement reproduits. Dans ce cadre, les tests à appliquer sont clairement définis, et deux d'entre eux sont systématiquement mentionnés dans la littérature (voir notamment Hal Pedersen (2016) et ACPR (2015)).

Le premier consiste en la validation de la propriété « market consistent » des scénarios générés. Il s'agit de comparer les prix ou les volatilités implicites issues des scénarios du GSE aux prix de marché observés (caps, floors, swaptions, options sur actions, etc.). Une formulation mathématique possible est de s'assurer de l'égalité suivante,

$$\underbrace{P(t=0)}_{\substack{\text{prix observé}\\ \text{de l'option}}} = \underbrace{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} D_i\, X_i}_{\substack{\text{prix calculé}\\ \text{via les simulations du GSE}}}$$

Ce test peut être réalisé de plusieurs manières, comme présenté dans ACPR (2020) :

- **Tests analytiques** : ils consistent à comparer les prix de marché des actifs utilisés pour la calibration (ou leurs volatilités implicites) avec les prix théoriques issus du modèle, obtenus à l'aide d'une formule fermée dépendant des paramètres retenus.
- **Tests Monte Carlo** : ils reposent sur une comparaison directe entre les prix de marché et les prix simulés à partir du GSE, calculés sur la base des trajectoires générées par méthode de Monte Carlo.

Il convient de ne pas se limiter aux seuls tests analytiques et de compléter ceux-ci par des tests Monte-Carlo sur les scénarios eux-mêmes, et toute dérive significative doit être justifiée ou corrigée.

D'après ACPR (2020), il s'agit d'exigences de l'article 22 §3 du Règlement Délégué Solvabilité 2 pour l'évaluation market-consistent.

La deuxième analyse à effectuer dans la validation des scénarios risque neutre consiste à s'assurer de l'hypothèse d'Absence d'Opportunités d'Arbitrage, par la réalisation d'un test de Martingalité. Concrètement, on vérifie que sous les scénarios générés, la valeur moyenne actualisée d'un actif reste toujours égale à son prix initial (principe de martingale), ce qui se teste notamment en simulant de nombreux chemins et en calculant la moyenne actualisée :

$$\underbrace{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} D_{i,t}\left(1+R_{t,i}^{\text{cum}}\right)}_{\substack{\text{moyenne des valeurs actualisées}\\ \text{des rendements cumulés simulés}}} = \underbrace{1}_{\substack{\text{prix de marché actuel}\\ \text{(normalisé à 1)}}}$$

Toute déviation significative indiquerait un problème (ex. biais dans les tirages, ou erreur dans l'intégration numérique). Ces tests sont indispensables pour attester que le GSE risque neutre respecte la condition « market-consistent » requise par Solvabilité II et IFRS 17.

D'autres tests sont également envisageables. Dans sa Notice Solvabilité II pour le calcul des Provisions Techniques (ACPR (2015)), l'ACPR conseille la réalisation de tests de sensibilité pour justifier de la robustesse de l'outil, consistant à apprécier l'effet de la variation de certains paramètres et hypothèses sur la valorisation du passif, ou encore de tests de corrélations entre

facteurs ; même en risque neutre, les dépendances entre facteurs (taux, actions, spreads, inflation, etc.) doivent être cohérentes avec les données de marché (si elles existent) ou, à défaut, avec des hypothèses justifiables. Il convient de vérifier que la structure de corrélation calibrée se retrouve dans les scénarios simulés, sans introduire d'opportunités d'arbitrage ACPR (2020).

3.1.3 Analyse de la convergence, stress tests et études de la génération de nombre aléatoires

La Notice Solvabilité II de l'ACPR pour le calcul des Provisions Techniques (ACPR (2015)) fait également référence à la nécessité d'une analyse de la convergence pour justifier de la précision de l'outil. À titre indicatif, pour le calcul du BE, il est recommandé de viser une incertitude inférieure à 0,2% avec un niveau de confiance de 95%, pratique couramment observée sur le marché. Généralement, un minimum de 1 000 scénarios est nécessaire pour obtenir une précision acceptable. Enfin, l'utilisation de techniques appropriées de réduction de variance, telles que les variables antithétiques, permet de diminuer cette incertitude sans augmenter le nombre de scénarios.

Pour Faleh et al. (2010), la stabilité interne (et externe si possible) de l'échantillon est une condition minimale à respecter pour assurer la bonne qualité des solutions fournies par le GSE comme outil d'aide à la décision.

La stabilité interne fait référence à la convergence des résultats d'un problème d'optimisation si l'on relance plusieurs fois un GSE avec les mêmes paramètres, assurant que la variabilité observée vient du modèle économique et pas du hasard de la simulation.

La stabilité externe, plus difficile à vérifier, est liée à la convergence des résultats du générateur de scénarios économiques (GSE) vers une solution proche de l'optimum réel lorsque de nouveaux scénarios sont générés indépendamment du jeu de données initial.

La condition d'absence de biais au niveau de la solution proposée y est également abordée, mais le test de cette propriété reste infaisable dans une partie des cas (le problème d'optimisation avec le processus continu réel est supposé inconnu).

Par ailleurs, les entreprises doivent également tester les générateurs de nombre aléatoires et pseudo-aléatoires (Orientation 59) utilisés dans le GSE, en examinant sa période et sa discrépance.

Un cadre typique et idéal du processus de validation est proposé dans la 10, par Hal Pedersen (2016). En pratique, l'accent doit être mis sur l'application d'un processus de validation comprenant plusieurs types d'analyses et seuils critiques, permettant non seulement de déterminer ce qui ne va pas dans le modèle, mais également ce qui marche correctement. Finalement, l'importance de l'humain dans la validation du GSE est capitale.

3.2 Documentation et traçabilité

Un GSE, en tant que composant d'un modèle interne, doit être exhaustivement documenté. La documentation doit couvrir la théorie et les fondements mathématiques du modèle, les hypothèses sous-jacentes, les méthodes de calibration et leurs limites, ainsi que des justifications pour les choix effectués. Elle doit inclure, un manuel d'utilisation, une description des processus de calcul, les résultats types générés par le modèle, et les preuves des tests de validation effectués. Par ailleurs, la traçabilité implique de conserver l'historique des versions du modèle, des calibrations successives et des modifications apportées (avec leurs motifs). Chaque résultat chiffré important (par exemple, une valeur Best Estimate) doit pouvoir être relié aux entrées du modèle et aux paramètres utilisés pour qu'un audit puisse reproduire le calcul. Les régulateurs insistent aussi sur la documentation des données et modèles externes utilisés le cas échéant (si on utilise un logiciel externe ou des données de marché, il faut en comprendre le fonctionnement et en contrôler la qualité).

3.3 Gouvernance du modèle

La gouvernance recouvre l'organisation des rôles autour du GSE. Cela inclut la nomination d'un propriétaire du modèle (responsable de son développement et de sa maintenance), d'une équipe de validation indépendante, et souvent d'un comité "Modèles" supervisant l'ensemble. Ce comité passe en revue au moins annuellement la performance du GSE, approuve les calibrations, et valide

les changements méthodologiques avant implémentation. L'indépendance entre développement et validation est un principe clé mis en avant par les régulateurs. De plus, Solvabilité II introduit la notion de "Use Test" pour les modèles internes : l'assureur doit démontrer que son GSE n'est pas qu'un exercice théorique pour le régulateur, mais qu'il est intégré dans les processus de décision et de gestion interne (par exemple utilisé réellement pour l'ALM, la gestion des risques, etc.). Cela pousse à une gouvernance vivante du modèle, où les utilisateurs finaux (direction financière, directions des risques) s'approprient les résultats du GSE. Enfin, les auditeurs internes ou externes peuvent être amenés à revoir le GSE, d'où l'importance d'une gouvernance solide pour apporter les justifications et corrections nécessaires en cas de critiques.

D'après une étude de l'ACPR (voir ACPR (2020)), le calcul stochastique (utilisé pour générer les trajectoires issues des GSE) conduit à renchérir le BE de près de 2% avec une dispersion relativement importante, résultante du portefeuille mais également des choix de modélisation au sein du GSE. Il est donc nécessaire que les choix entourant le GSE (modèles, granularités retenues, méthodes de calibrage, dépendance entre les facteurs de risque, politique de tests...) soient soumis pour discussion et validation aux comités responsables du calcul du BE. Il est, entres autres, attendus que la réalisation de tests de sensibilités soient réalisés pour garantir la robustesse du GSE (comme requis par la Notice 5.15 ACPR (2015)). Comme expliqué dans l'introduction de la revue, l'externalisation de tout ou partie du développement des GSE est pratique courante, cela n'exonère en rien l'organisme de s'assurer de la qualité des travaux réalisés par le prestataire et des scénarios du GSE (l'organisme en conserve la responsabilité). L'organisme doit, entre autres, analyser en profondeur les calculs réalisés par le prestataire concernant les tests de martingalité, de corrélation et de market consistency (dans le cas d'un GSE risque neutre).

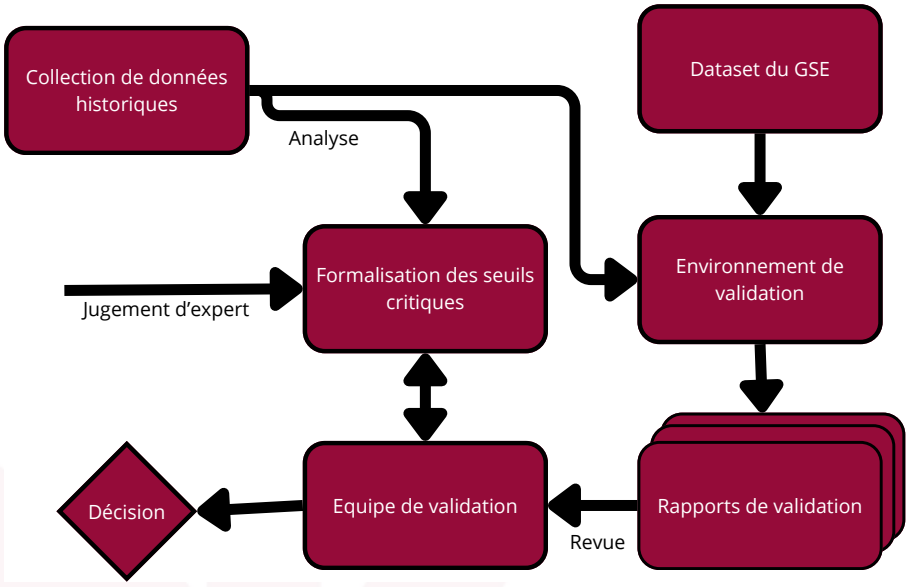

Figure 10 Etapes principales dans un processus de validation idéal

4 Benchmark des outils en place

Pour compléter cette revue, nous avons réalisé une étude des différents outils GSE disponibles sur le marché, en nous appuyant sur une série de paramètres d'appréciation. Parmi ces paramètres figure la personnalisation des modèles, c'est-à-dire la capacité de l'outil à ajuster ou à créer des modèles sur mesure pour répondre à des besoins spécifiques (comme l'analyse des spreads de crédit ou la prise en compte des risques climatiques). Un autre aspect important concerne le type de scénarios proposés par ces outils. Comme nous l'avons présenté, certains privilégient des scénarios basés sur une mesure risque neutre, principalement utilisés pour la valorisation de produits financiers, tandis que d'autres adoptent des hypothèses économiques réelles. Nous avons également examiné l'existence de modules spécifiques, afin de connaître la diversité des fonctionnalités offertes par chaque outil. Cela inclut notamment des modules dédiés aux normes

IFRS 17, à la modélisation des risques liés au changement climatique ou encore à l'ALM. Par ailleurs, la granularité des trajectoires, c'est-à-dire la fréquence à laquelle les données sont générées (mensuelle, trimestrielle, annuelle ou personnalisable), constitue un critère déterminant. Enfin, la présence d'API ou de Web Services a été évaluée, car une interface permettant d'automatiser les requêtes et les échanges via des protocoles tels que REST ou SOAP représente un avantage considérable pour l'intégration et l'interopérabilité des systèmes. La capacité Big Data des outils, quant à elle, permet de savoir s'ils supportent des formats modernes (comme HDF5 ou Parquet) pour traiter et stocker efficacement des volumes importants de données. Ces différents paramètres permettent ainsi d'établir une comparaison détaillée et structurée des outils GSE présents sur le marché.

Outils GSE	**Personnal modèles**	**Type de Scénario**	**Modules spécifiques**	**Granulari des trajectoires**	**API/WEI Services**	**Interface utilisateurs**	**Big data**
Ortec Finance GSE	✓Moyenne	Risque neutre et monde réel	✓Climat et IFRS 17	Mensuelle, annuelle	✓Oui	✓Dashboar	✓Oui
Moody's ESG	✗Limitée	Risque neutre et monde réel	✗Peu de modules	Mensuelle, trimestrielle	✓Oui	✓Excel	✗Non
Conning GEMS	✓Avancée	Risque neutre et monde réel	✓Climat, ALM	Mensuelle, trimestrielle, annuelle	✓Oui	✓Dashboar	✓Oui
Milliman ESG	✓Avancée	Risque neutre et monde réel	✓Climat, ALM	Trimestriell annuelle	✓Oui	✓Dashboar	✓Oui
STAR ESG	✓Avancée	Risque neutre et monde réel	✓ALM, S2	Mensuelle, trimestrielle, annuelle, personnalisable	✓Oui	✓Excel	✗Non
NeuronAI	✓Très avancée (IA & ML)	Risque neutre et monde réel	✓Modules prédictifs	Mensuelle, personnalisable	✓Oui	✓Dashboar	✓Oui

Un exemple de Générateur de Scénarios Economiques développé par Reacfin est également disponible, gratuitement, au lien suivant : ESG Reacfin

Conclusion

Les générateurs de scénarios économiques se révèlent être des outils indispensables pour les compagnies d'assurance, permettant d'évaluer avec précision l'impact des chocs économiques sur leurs bilans et de satisfaire aux exigences réglementaires en constante évolution. L'intégration d'approches basées à la fois sur la mesure du risque réel (monde réel) et sur des modèles calibrés au marché (risque neutre) offre une vision plus complète et robuste de l'évolution des risques et de la valorisation des engagements. La mise en place d'un processus de validation rigoureux, incluant des tests statistiques, des analyses de convergence et un benchmarking détaillé des outils existants,

garantit la fiabilité et la pertinence des projections. Enfin, une documentation exhaustive et une gouvernance adaptée sont essentielles pour assurer que ces modèles s'intègrent pleinement dans les processus décisionnels et de gestion des risques des assureurs. Ces éléments conjoints permettent non seulement de répondre aux exigences actuelles (Solvabilité II, IFRS 17) mais aussi de préparer le secteur aux défis futurs.

Le développement futur des modèles se fera en alignement avec des avancées théoriques ainsi que par des chocs exogènes (nouvelles régulations, crises, influences sociales...). Jakhria (2017). Ce qui est certain, dans un monde où la Big Data est déjà omniprésente, c'est la nécessité de faire des liens forts entre les méthodes empiriques "data driven" et celles fondées par la théorie économique. Couplés à la puissance grandissante de calcul, à l'avènement de la Big Data et à la démocratisation des méthodes de Machine et Deep Learning, les GSE continueront à modeler le paysage actuarial. Pour ne citer qu'une évolution potentielle, les recherches actuarielles récentes explorent de nouveaux outils comme les Generative Adversarial Networks (GAN) pour améliorer la génération de scénarios.

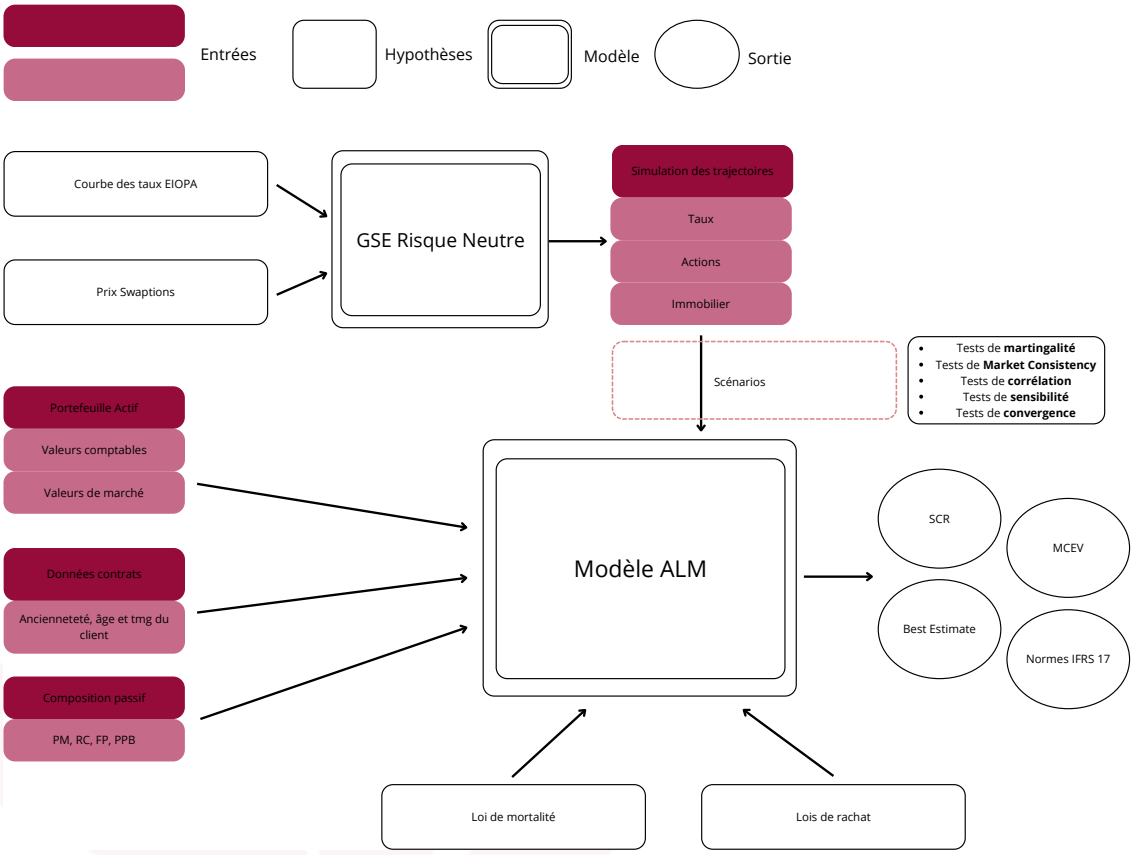

Figure 11 Workflow d'un GSE risque neutre

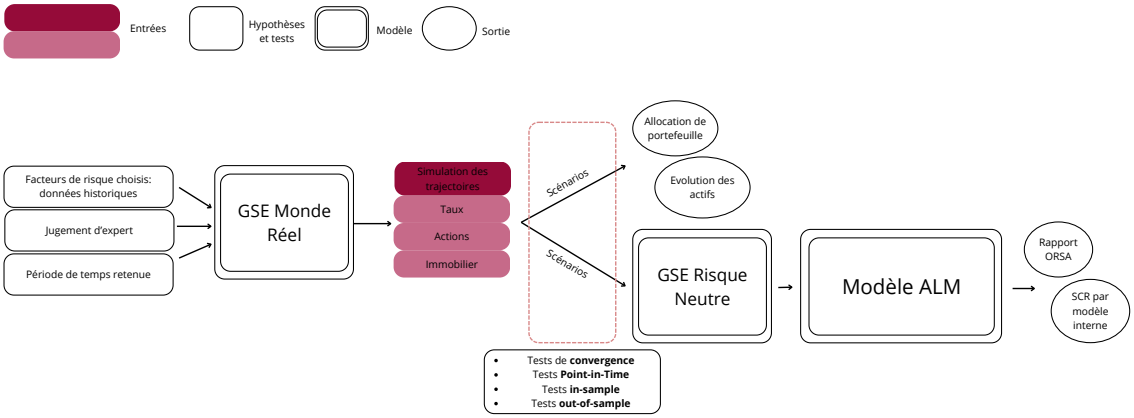

Figure 12 Workflow d'un GSE monde réel

References

(2009). Directive 2009/138/ce du parlement europeen et du conseil du 25 novembre 2009 sur l'acces aux activites de l'assurance et de la reassurance et leur exercice (solvabilite ii) (refonte) (texte presentant de l'interet pour l'eee). Journal officiel de l'Union européenne, L 335, 17 décembre 2009.

ACPR (2015, août). Notice solvabilité ii – provisions techniques (y compris mesures "branches longues"). Technical report, Autorité de Contrôle Prudentiel et de Résolution (ACPR).

ACPR (2020, décembre). Générateurs de scénarios économiques : points d'attention et bonnes pratiques. *Revue de l'ACPR*.

Actuelia (2020). Retour de l'acpr sur le générateur de scénarios économiques : points d'attention et bonnes pratiques.

Addactis (2022). Ifrs 17 : Reconciliation multi-normes comparaison solvabilité ii - ifrs 17 et transition du pl d'ifrs 4 à ifrs 17. Technical report, Addactis.

Aguir, N. (2012). Impact de la modélisation multi-états sur le scr en prévoyance. Mémoire de diplôme universitaire d'actuariat, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

Armel, K. and F. Planchet (2018a, mai). Comment construire un générateur de scénarios économiques risque neutre destiné à l'évaluation économique des contrats d'épargne ? Technical report, Laboratoire SAF – Sciences Actuarielle et Financière.

Armel, K. and F. Planchet (2018b, avril). Comment définir la qualité d'un générateur de scénarios économiques destiné à évaluer le *best-estimate épargne* en € ? Technical report, Laboratoire SAF – Sciences Actuarielle et Financière.

Aroule, R. (2022). Approche d'agrégation de contrats d'assurance en model points et impact sur la projection alm. Mémoire de diplôme universitaire d'actuariat, Université Paris-Dauphine.

AUBERT-LASSARADE, L. (2025). Modélisation et analyse d'un générateur de scénarios économiques non-paramétrique.

Benadjal, I. (2020). Les gse sous solvabilité ii : aspects théoriques, limites, et pistes d'évolution. Mémoire de diplôme universitaire d'actuariat, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

Bernard, R. (2013). Rentabilité d'un contrat d'épargne en euros sous solvabilité ii. Mémoire de diplôme universitaire d'actuariat, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

Bouzinab, F. (2016). Bridging d'un modèle alm : un outil de compréhension et de sensibilité des interactions actif-passif. Mémoire de diplôme universitaire d'actuariat, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

Druais, M. (2012). Pourquoi et comment calibrer le risque de marché sous solvabilité 2 ?le rôle central du générateur de scénarios économiques. Mémoire de fin d'études en actuariat, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

EIOPA (2014). Guidelines on the use of internal models. Technical report, European Insurance and Occupational Pensions Authority (EIOPA).

Faleh, A., F. Planchet, and D. Rullière (2010, avril-juillet). Les générateurs de scénarios économiques : de la conception à la mesure de la qualité. *Assurances et gestion des risques / Insurance and Risk Management 78*(1-2), 31–70.

Groupe de travail GSE – Institut des Actuaires (2011). Générateur de scénarios Économiques : Principes et mise en œuvre. Technical report, Institut des Actuaires.

Hal Pedersen, M. P. C. e. a. (2016, July). Economic scenario generators a practical guide. Technical report, Society of Actuaries.

IAIS (2023). Insurance capital standard (ics) : Reference ics and ics version 2.0 for the monitoring period – technical specifications and calibration document. Technical report, International Association of Insurance Supervisors (IAIS).

Jakhria, P. (2017). Economic scenario generators.

Joliton, N. (2012). Approche standard ou modèle interne sous solvabilité ii : impacts sur l'évaluation des passifs ifrs 4 phase 2. Mémoire de diplôme universitaire d'actuariat, Université Claude Bernard Lyon 1, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

Kamega, A. (2015, janvier). Introduction aux générateurs de scénarios économiques : Application aux courbes des taux. Technical report, EURIA – Euro-Institut d'Actuariat, Université de Brest.

Monnery, A. (2014). L'orsa : approche par générateur de scénarios économiques non-paramétriques. Mémoire de master, Université non spécifiée.

Moody's Analytics (2023). Ifrs 17 discount curves : A high-level overview. White paper, Moody's Analytics.

Nexialog Consulting (2021, avril). Ifrs 17 risk adjustement. Technical report, Nexialog Consulting.

NTS Advisory (2018, mars). Livre blanc : de l'ifrs 9 à l'ifrs 17. Technical report, NTS Advisory.

P. Jakhria, R. Frankland, S. S. A. S. A. R. T. W. (2018). Evolution of economic scenario generators : a report by the extreme events working party members. *British Actuarial Journal 24*.

Planchet, F. (2025, février). Construction et utilisation de scénarios économiques dans le contexte de solvabilité 2. Technical report, Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA).

Prim'Act (2023). Gse : quel calibrage "cohérent" avec des valeurs de marché ?

Rattaz, R. (2017). Solvabilité ii – mcr : Calcul du minimum de capital requis.

Sekkat, S. (2016). Introduction à la réforme réglementaire solvabilité 2.