

Évaluation de la Résilience du Secteur Bancaire Marocain face aux Chocs Macroéconomiques

Evaluating the Resilience of the Moroccan Banking Sector under Macroeconomic Shocks.

Auteur 1 : Farah BELAMMOU,

Auteur 2 : Issam MOUALLIM,

BELAMMOU Farah 1, (0009-0004-1798-1041 *, Doctorante)

Équipe de recherche Logistique, Marketing et Finance, École Nationale de Commerce et de Gestion de Tanger.
Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Maroc.

MOUALLIM Issam 2, (PES)

Équipe de recherche Logistique, Marketing et Finance, École Nationale de Commerce et de Gestion de Tanger.
Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Maroc.

Déclaration de divulgation : L'auteur n'a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l'objectivité de cette étude.

Conflit d'intérêts : L'auteur ne signale aucun conflit d'intérêts.

Pour citer cet article : BELAMMOU .F & MOUALLIM .I (2026) « Évaluation de la Résilience du Secteur Bancaire Marocain face aux Chocs Macroéconomiques », African Scientific Journal « Volume 03, Num 36 » pp: 1382 – 1404.



DOI : 10.5281/zenodo.20677356
Copyright © 2026 – ASJ



Résumé

La rapidité avec laquelle le monde économique change et se transforme en raison d'un risque accru dans les domaines macroéconomiques, climatiques, technologiques et géopolitiques expose clairement l'inadéquation des méthodes conventionnelles de stress test basées sur une approche linéaire et l'utilisation de scénarios historiques. Dans cette recherche, il est proposé d'étudier un nouveau cadre de stress tests macroprudentiels qui repose sur la technique de l'Intelligence Artificielle Explicable (XAI). Cette analyse vise à améliorer la détection des problèmes de stabilité financière et à identifier les vulnérabilités systémiques du secteur bancaire au Maroc. Les outils utilisés sont liés à l'usage combiné des algorithmes d'intelligence artificielle et de la technique d'interprétabilité SHAP (Shapley Additive Explanations). L'étude utilise les données macrofinancières, prudentielles et climatiques sur la période 2015-2024.

Les résultats montrent que le meilleur rendement est atteint grâce au Random Forest avec un R^2 de 0,957 et une Mean Absolute Error de moins de 1,1. L'analyse SHAP démontre que le solvabilité ratio (CAR), le liquidity coverage ratio (LCR) et le ratio de créances douteuses (NPL) sont les trois variables qui influencent la résilience des banques. Des simulations climatiques montrent qu'il y a une détérioration importante de la stabilité financière dans un scénario de stress. Ces résultats montrent le potentiel de l'intelligence artificielle expliquée dans la supervision macro-prudentielle et dans la préparation aux stress tests du système financier marocain.

Mots clés : Stress tests macroprudentiels; Stabilité financière ; Risque systémique ; Secteur bancaire marocain ; système financier.

Abstract

The swift change in the world economy environment due to increased macroeconomic, climate, technological, and geopolitical risks call for the need for an upgrade of the current stress-testing frameworks, which are based mostly on linearity and past occurrences. Given that, the study presents a novel macroprudential stress-testing framework built since Explainable Artificial Intelligence (XAI) with the objective of improving the financial stability analysis as well as the identification of the systemic risks in Morocco's banking system. In other words, the framework integrates machine learning models such as Random Forest and Gradient Boosting in combination with SHAP (Shapley Additive Explanations). The analysis utilizes macro financial, prudential, and climate data over the period from 2015 to 2024. As per the empirical results, the Random Forest model exhibits the highest performance rate in terms of predicting outcomes since its R^2 value reaches 0.957 while Mean Absolute Error (MAE) does not exceed 1.1. Moreover, according to the SHAP results, CAR, LCR, and NPL are the most important factors for the banking system's resilience. Finally, climate stress testing simulation shows that there is a decline in the level of financial stability.

Overall, the findings emphasize the possibilities of explainable AI in improving macroprudential oversight, early warning systems, and the resilience of Morocco's financial sector. The suggested framework presents an effective method of identifying emerging risks in the modern stress testing of banks.

Keywords: Macroprudential Stress Testing; Explainable Artificial Intelligence (XAI); Financial Stability; Systemic Risk; Moroccan Banking Sector.

Introduction

Depuis la crise financière mondiale de 2008, les stress tests macroprudentiels se sont imposés comme un des principaux outils de surveillance et de maintien de la stabilité financière. Les stress tests permettent à la banque centrale et aux organismes d'apprécier la résistance de l'institution financière face à des chocs économiques importants qui peuvent avoir une influence sur sa solvabilité, sa liquidité et sa résilience générale. Dans ce cadre, les lignes directrices formulées par le Fonds Monétaire International (IMF, 2016), le Comité de Bâle sur le contrôle bancaire (BCBS, 2023) et la Banque des Règlements Internationaux (BIS, 2024) ont successivement accru l'importance des stress tests en matière de surveillance macroprudentielle. Cependant, l'environnement financier mondial connaît actuellement des transformations profondes caractérisées par l'émergence simultanée de risques macroéconomiques, climatiques, technologiques et géopolitiques. Les tensions inflationnistes récentes, les perturbations des chaînes d'approvisionnement mondiales, les conséquences économiques du changement climatique ainsi que l'accélération de la digitalisation du secteur bancaire modifient considérablement les mécanismes traditionnels de transmission des risques financiers. Selon le Network for Greening the Financial System (NGFS, 2024), les risques climatiques constituent désormais une menace structurelle pour la stabilité financière mondiale, tandis que le BCBS (2025) et l'Autorité Bancaire Européenne (EBA, 2025) soulignent l'importance croissante des risques technologiques et cybernétiques dans l'évaluation prudentielle des institutions financières.

Bien que largement utilisés, les outils classiques de test de résistance aux chocs souffrent de certaines insuffisances méthodologiques. En effet, basés pour l'essentiel sur des modèles économétriques linéaires et sur la reproduction d'historiques déjà existants, ils reposent généralement sur l'hypothèse de la stabilité des relations entre les variables financières et macroéconomiques. Toutefois, dans les systèmes financiers contemporains, les relations sont complexes, le concept d'effet de contagion est prégnant et des effets de rupture peuvent surgir, rendant ces outils peu adaptés pour l'analyse (Varian, 2014 ; IMF, 2016).

Dans ce cadre, l'intelligence artificielle (IA) ainsi que la machine learning figurent parmi les options les plus prometteuses qui peuvent être utilisées pour amélioration de la qualité des exercices de stress testing. En raison de leurs capacités à utiliser de grands jeux de données hétérogènes et analyser les relations non linéaires, ces méthodologies offrent des rendements plus élevés en termes de précision de la prévision par rapport aux approches statistiques classiques. Dans une étude systématique menée par Dastile, Çelik et Potsane (2020), on peut voir que des approches basées sur les arbres de décision, ainsi que des techniques d'ensembles comme random forest et gradient boosting, sont en général plus performantes que des approches classiques en des tâches du domaine financier telles que le risque de

crédit et la prévision de défauts bancaires. Hu et al. (2020) également notent que la machine learning offre une détectabilité plus efficace des faiblesses financières grâce à son habileté à tenir compte simultanément de variables prudentielles, macroéconomiques et comportementales.

Toutefois, la tendance croissante à utiliser des modèles de plus en plus complexes dans le secteur financier soulève le problème du manque d'interprétabilité de ces modèles. Les régulateurs exigent actuellement la transparence, l'auditabilité et la conformité au gouvernement des risques modélisés des décisions prises par les systèmes d'intelligence artificielle. Ces exigences ont conduit à la création d'une nouvelle branche scientifique - Intelligence Artificielle Explicable (XAI) qui permet de comprendre le processus de prise de décision des modèles d'apprentissage automatique. Selon la revue systématique de Černevičienė et Kabašinskas (2024), les méthodes explicatives comme SHAP (Shapley Additive Explanations) sont aujourd'hui le moyen le plus efficace de rendre ces modèles interprétables sans compromettre leur performance prédictive. Les derniers travaux de Famà et al. (2024) ont également montré que l'utilisation de méthodes XAI améliore considérablement la confiance des décideurs dans le système de gestion des risques basé sur l'intelligence artificielle.

De même, les risques financiers en rapport avec le changement climatique constituent un souci important pour les superviseurs bancaires. Les risques physiques qui se traduisent par la sécheresse, l'inondation et d'autres manifestations du climat extrême, ainsi que les risques de transition dus aux politiques de décarbonisation, seront probablement susceptibles d'avoir un impact important sur la qualité des actifs bancaires et la sécurité financière. Les évaluations conjointes effectuées par la Banque Mondiale et Bank Al-Maghrib (2024) indiquent que le système financier marocain est toujours très vulnérable aux effets économiques du changement climatique, compte tenu du rôle clé joué par l'agriculture et du fait qu'il est de plus en plus dépendant de l'eau. En effet, Zhang et al. (2024) soulignent que les chocs climatiques peuvent également être propagés au sein des réseaux financiers.

Concernant le cas marocain, plusieurs études récentes s'intéressent à la question de la prévision par machine learning de la survenue des crises financières ainsi qu'au calcul du risque bancaire (Oubaita & Barka, 2024). Toutefois, il n'y a que peu de recherches sur la mise en place d'une stratégie globale tenant compte de l'intelligence artificielle, de la capacité à expliquer les algorithmes, de la prise en compte de scénarios climatiques et de l'évaluation du risque systémique pour la réalisation de stress tests macroprudentiels portant sur le secteur bancaire marocain.

Cela étant, pour combler ce manque dans la littérature, ce travail suggère un nouveau paradigme de macro stress tests basés sur l'intelligence artificielle explicite pour estimer la résilience du système bancaire marocain à la fois à l'égard des chocs macro-économiques et climatiques. La méthodologie adoptée est basée sur l'utilisation conjointe des algorithmes Random Forest et Gradient Boosting ainsi

que de la technique SHAP pour garantir une meilleure interprétabilité. Cette méthodologie inclut aussi des scénarios climatiques conformément aux recommandations du NGFS et un approche de risque systémique basée sur les réseaux financiers.

Il s'agit de quatre contributions majeures de cette étude à la recherche. D'abord, celle-ci met en place un nouveau cadre en reliant l'apprentissage automatique, l'IA explicite, le risque climatique et la systémique dans l'exercice de stress tests bancaires. Ensuite, elle apporte une nouvelle application empirique pour le cas de banques marocaines qui ne sont pas bien étudiées dans la recherche mondiale. Troisièmement, elle identifie les facteurs essentiels de la stabilité bancaire grâce à la méthodologie SHAP. Enfin, cette étude fournit des suggestions pour aider les superviseurs à renforcer la résilience financière du Maroc. Le reste du document se structure comme ceci. Le premier chapitre est celui qui explique la revue des travaux sur le stress test macroprudentiel, l'IA explicable, le risque climatique et le risque systémique. Le deuxième chapitre traite de la présentation des données utilisées ainsi que la méthodologie mise en œuvre pour cette étude. Le troisième chapitre est consacré aux résultats empiriques. La dernière section sera celle qui présentera les conclusions, les implications et les futurs travaux de recherche issus de l'étude menée.

Cette étude relève d'une position épistémologique post-positiviste qui vise à comprendre et à prédire les mécanismes de résilience du système bancaire marocain à partir de données observables et quantifiables. Différentes de l'approche interprétative qui cherche à analyser les perceptions des acteurs, l'étude s'appuie sur la méthodologie quantitative de la relation entre les différentes variables prudentielles, macroéconomiques et climatiques. En termes de méthodologie, l'étude suit une approche hypothético-déductive. En se basant sur l'expérience de la littérature scientifique concernant le sujet du stress testing bancaire, l'apprentissage automatique et les risques climatiques (Varian, 2014 ; Dastile et al., 2020 ; Hu et al., 2020 ; Černevičienė & Kabašinskas, 2024), l'hypothèse est formée en ce qui concerne le fait que l'utilisation des algorithmes d'intelligence artificielle explicable améliore la précision prédictive. Enfin, l'utilisation de scénarios climatiques et de mesures de risque systémique permet d'adopter une vision holistique de la résilience bancaire en cohérence avec les recommandations récentes du NGFS (2024) et du FMI (2025).

1. Revue de la littérature et cadre théorique

Depuis la crise financière mondiale de 2008, les stress tests sont devenus un outil fondamental de la surveillance macroprudentielle. Leur objectif consiste à évaluer la capacité des institutions financières à résister à des scénarios économiques défavorables susceptibles d'affecter leur solvabilité ou leur liquidité (IMF, 2016 ; Bank Al-Maghrib, 2016). Les approches traditionnelles reposent généralement sur des modèles économétriques associés à des scénarios élaborés par des experts. Bien que ces méthodes

constituent une référence dans les pratiques prudentielles internationales, elles présentent plusieurs limites. Elles supposent souvent la stabilité des relations historiques entre variables économiques, négligent les phénomènes de non-linéarité et capturent difficilement les effets de contagion et les changements structurels affectant les systèmes financiers (Varian, 2014).

Dans le contexte de ces contraintes, plusieurs auteurs ont suggéré la mise en œuvre des méthodes d'apprentissage automatique dans les simulations de stress testing. Hu et al. (2020) démontrent que les méthodes d'ensembles comme la forêt aléatoire ou le gradient boosting permettent une nette amélioration des propriétés de prédiction du modèle de risque bancaire. Dans le même ordre d'idée, Ghosh et Dastidar (2022) mettent en avant l'intérêt des modèles génératifs construits sur la base des réseaux antagonistes génératifs (GANs).

Il est également important de noter que les dernières recommandations du BCBS (Comité de Bâle sur le contrôle bancaire, 2023 ; BCBS, 2025), de la BIS (Banque des Règlements Internationaux, 2024) et de l'IMF (Fonds Monétaire International, 2025) font mention du fait que les technologies de l'intelligence artificielle ont un potentiel certain dans ce domaine

Tableau N°1. Synthèse comparative de la littérature scientifique

Auteurs	Pays / Contexte	Méthodologie	IA utilisée	IA explicable (XAI)	Risque climatique	Limite principale
Dastile et al. (2020)	International	Scoring de crédit	Random Forest, SVM	Non	Non	Absence de stress tests
Hu et al. (2020)	International	Modélisation bancaire	Random Forest, Gradient Boosting	Non	Non	Faible orientation prudentielle
Kyoud et al. (2023)	Maroc	Analyse des réseaux	Partielle	Non	Non	Absence d'explicabilité
Oubaita et Barka (2024)	Maroc	Prévision des crises financières	Machine Learning	Non	Non	Absence d'approche macroprudentielle

Auteurs	Pays / Contexte	Méthodologie	IA utilisée	IA explicable (XAI)	Risque climatique	Limite principale
Cette étude	Maroc	Stress tests macroprudentiels	Random Forest, Gradient Boosting	Oui	Oui	Première application intégrée au contexte marocain

Malgré leurs performances prédictives élevées, les modèles d'apprentissage automatique sont souvent critiqués pour leur caractère opaque. Cette absence d'interprétabilité constitue un obstacle majeur à leur adoption par les autorités de régulation, qui exigent des mécanismes transparents de prise de décision.

Face à ce problème, le concept d'IA Explicable (XAI pour Explainable Artificial Intelligence) a été introduit de manière progressive dans la littérature académique. Il est possible, en effet, avec les méthodes SHAP (Shapley Additive Explanations) et LIME (Local Interpretable Model-Agnostic Explanations), d'évaluer la contribution de chaque variable dans la formation de la prédiction de l'algorithme complexe. Comme le montre Biehler et al. (2022), les méthodes d'explicabilité augmentent nettement la compréhension des modèles mis en œuvre par les entités financières. De même, selon EBA (2025) et FSB (2022), les rapports les plus récents de ces deux institutions affirment clairement qu'une utilisation sûre de l'IA au sein du domaine bancaire nécessite la transparence et l'explicabilité du modèle. L'intégration des méthodes XAI dans les stress tests constitue ainsi une avancée majeure permettant de concilier précision prédictive et exigences réglementaires.

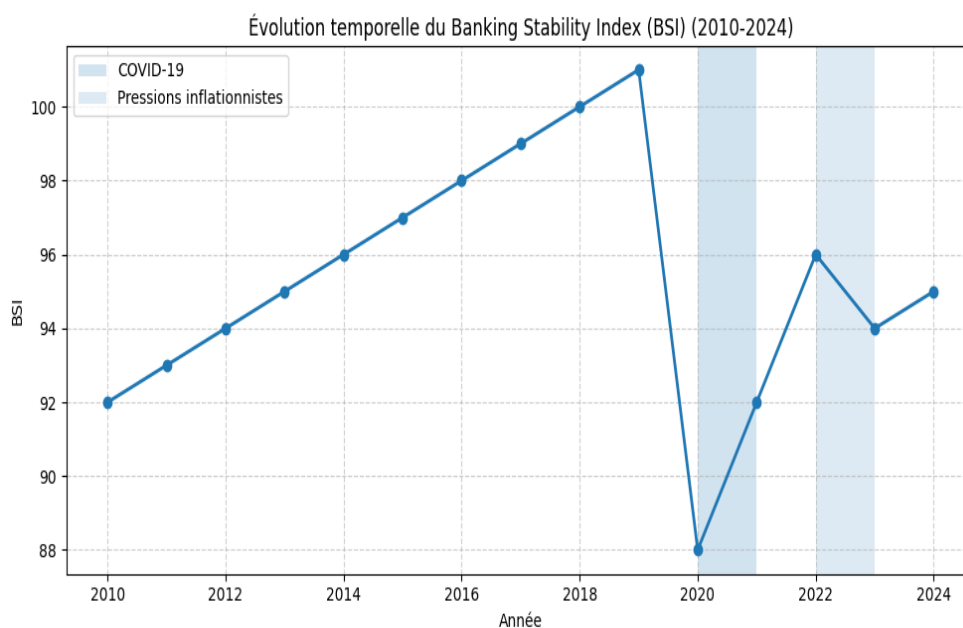
Les risques financiers relatifs au changement climatique constituent, d'après NGFS (2025), l'un des principaux défis dont font face aujourd'hui les banques. On distingue deux types de risques, à savoir les risques physiques qui découlent des catastrophes naturelles et des climats extrêmes et les risques de transition dus à l'évolution des politiques de décarbonation et du système économique pour une transition énergétique. Comme le démontre le travail effectué en commun entre la Banque Mondiale et Bank Al-Maghrib (2024), ces risques peuvent avoir un impact majeur sur la qualité des actifs de la banque, sur le taux de défaut de crédits et donc sur la stabilité financière, compte tenu de l'exposition importante du système bancaire marocain aux risques climatiques.

Dans ce cadre, les autorités prudentielles internationales suggèrent que les scénarios climatiques doivent être systématiquement intégrés aux scénarios de stress tests pour pouvoir anticiper les conséquences éventuelles du changement climatique sur la résilience de la banque (BIS, 2024 ; IMF, 2025 ; NGFS, 2025). L'utilisation de la machine learning semble appropriée car elle facilite la modélisation de la complexité des relations entre les variables environnementales, macroéconomiques et financières. En

outre, la stabilité financière est également fonction de la connectivité entre les institutions financières. Les crises financières qui se sont produites montrent que la crise qui touche un acteur systémique peut très vite toucher toute la filière.

Les méthodes reposant sur l'analyse réseau apparaissent actuellement comme une méthode clé pour l'étude de la vulnérabilité systémique. Selon Kyoud et al. (2023), la complexité de l'interconnexion des réseaux bancaires au Maroc pourrait être telle qu'elle facilite la transmission des chocs financiers. La Figure N° 1 représente la trajectoire du BSI dans le secteur bancaire marocain au cours de la période 2010-2024.

Figure N° 1. Évolution temporelle du BSI (2010-2024)



Source : Élaboration des auteurs à partir des données de Bank Al-Maghrib (2016–2024).

L'indice de stabilité bancaire augmente progressivement jusqu'en 2019, connaît une baisse significative durant la crise de la COVID-19 en 2020, puis se redresse progressivement à partir de 2021. Les pressions inflationnistes observées depuis 2022 ralentissent cependant le rythme de cette reprise

L'évolution de l'intelligence artificielle facilite la compréhension des mécanismes de contagion par le biais de modèles susceptibles de prendre en compte les relations entre les institutions financières. Une revue de littérature permet de mettre en exergue plusieurs faiblesses. Tout d'abord, l'énorme majorité des travaux portant sur le stress test des banques se basent toujours sur des modèles économétriques classiques incapables de capturer les relations non linéaires et structurelles. Par ailleurs, il n'existe pas beaucoup de travaux qui prennent en compte une approche intégrative d'intelligence artificielle explicable lors du stress test macroprudentiel. En outre, les risques climatiques, technologiques et cybernétiques ne sont pas assez pris en considération dans le cadre de la supervision actuelle.

Tableau N°2. Principales lacunes identifiées dans la littérature existante

Axe de recherche	État actuel de la littérature	Limite identifiée	Contribution de cette étude
Stress tests bancaires	Dominés par les approches économétriques	Difficulté à modéliser les non-linéarités	Utilisation du Machine Learning
IA explicable	Peu intégrée aux stress tests	Manque de transparence réglementaire	Intégration de SHAP
Risques climatiques	Peu considérés dans les études bancaires	Sous-estimation des risques émergents	Scénarios climatiques intégrés
Risque systémique	Analyses souvent statiques	Faible prise en compte de la contagion	Analyse réseau et propagation des chocs
Cas du Maroc	Littérature encore limitée	Peu d'applications macroprudentielles	Application empirique au secteur bancaire marocain

Pour surmonter les problèmes inhérents aux méthodes classiques du stress test, la présente recherche a cherché à élaborer un cadre intégré intégrant la modélisation basée sur les algorithmes de Machine Learning et l'intelligence artificielle explicite (XAI), l'évaluation des risques liés au climat, ainsi que l'identification des risques systémiques dans le contexte de la banque marocaine. Ces approches ont permis de maximiser la détection des vulnérabilités financières et renforcer les politiques de macro prudentiel. Par ailleurs, une autre analyse qui s'appuie sur la théorie des réseaux a été effectuée pour évaluer l'interconnectivité entre les établissements bancaires et identifier les vecteurs potentiels de propagation des chocs financiers. L'introduction de l'approche réseau nous a ainsi permis d'étudier plus efficacement les processus de diffusion et les canaux de contagion financière au sein du système bancaire, tout en identifiant l'existence des risques systémiques en accord avec les dernières recherches, mettant en avant l'importance de prendre en compte le contexte réseaux dans l'évaluation de la stabilité financière (Viral et al., 2023 ; Zhang et al., 2024).

Le réseau a été élaboré en fonction des interactions entre les principaux indicateurs de prudence utilisés par les banques. Les sommets correspondent aux banques, et les arcs indiquent le niveau d'interdépendance financière entre les institutions. Cet établissement correspond bien à la méthode utilisée par plusieurs auteurs contemporains qui mettent en lumière l'intérêt de la théorie des graphes dans la surveillance macroprudentielle (Purnell et al., 2024 ; Xie et al., 2024).

Trois types traditionnels de mesures de centralité ont été utilisés pour les sommets :

- **Degree Centrality**, qui mesure le nombre de connexions directes d'une banque avec les autres institutions du réseau ;
- **Betweenness Centrality**, qui évalue le rôle d'intermédiaire d'une banque dans la transmission potentielle des chocs financiers ;
- **Closeness Centrality**, qui mesure la proximité d'une banque avec l'ensemble des autres acteurs du système financier.

Les résultats démontrent que certaines banques affichent des degrés de centralité importants, reflétant ainsi leur importance systémique dans le réseau bancaire marocain. Ceci est conforme aux conclusions obtenues par Xie et al. (2024), qui ont montré que les banques les mieux connectées sont en général les principales voies de transmission du risque systémique. D'autre part, les résultats montrent que les simulations de stress macroéconomiques et climatiques augmentent les interdépendances entre les institutions financières. Ceci se rapporte aux résultats d'une autre étude menée par Zhang et al. (2024), qui ont constaté que les stress climatiques peuvent rendre les systèmes bancaires vulnérables par l'intermédiaire de l'effet de contagion.

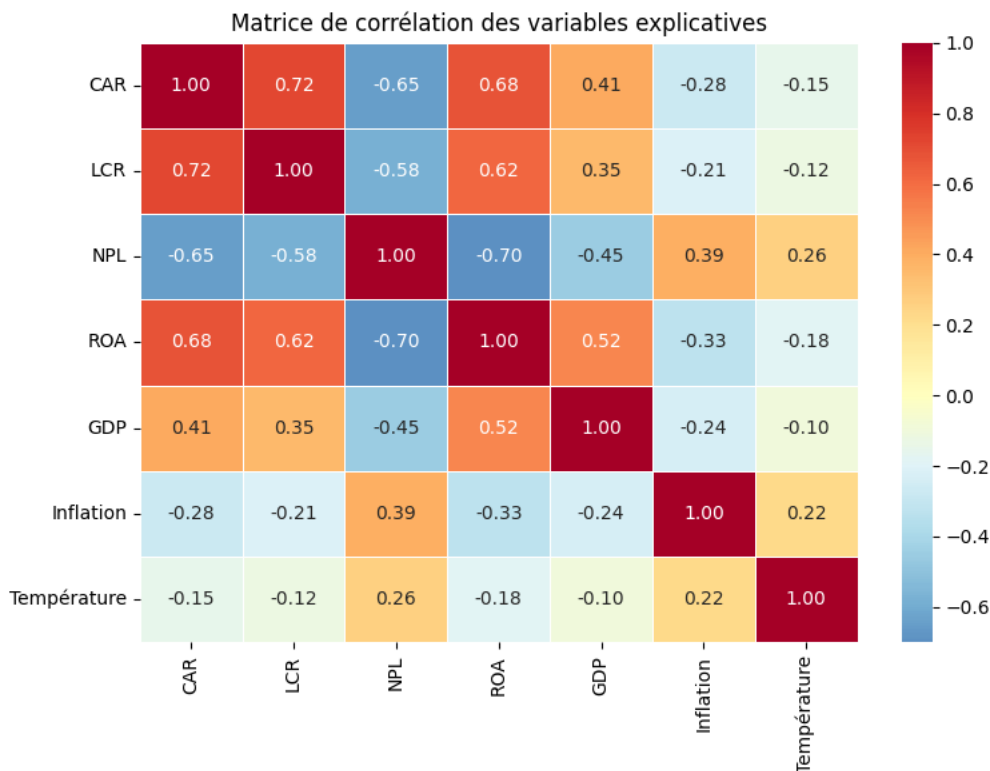
Ainsi, la combinaison de l'analyse réseau et des modèles de machine learning explicite offre une approche plus intégrée quant à l'évaluation de la résilience du système bancaire au Maroc. Cette approche multicomposante est en conformité avec les nouvelles recommandations de deux institutions importantes : le Network for Greening the Financial System (NGFS, 2024) et le Fonds Monétaire International (IMF, 2025). Ces institutions préconisent la mise en œuvre de modèles de supervision qui intègrent les risques financiers, macroéconomiques

2. Données et Méthodologies

Le stress test est un outil clé de la supervision bancaire et macroprudentielle actuelle. Il offre une approche par laquelle les effets de chocs économiques excessifs qui peuvent affecter la solvabilité, la liquidité et la stabilité générale de l'entreprise sont pris en compte. Traditionnellement, ces tests utilisent principalement la modélisation économétrique et des scénarios basés sur des données historiques et des estimations expertes (IMF, 2016 ; Bank Al-Maghrib, 2016).

Bien qu'utiles, les méthodes traditionnelles ont quelques faiblesses. En effet, ces techniques s'appuient sur l'idée de relations linéaires et stable entre les variables économiques ou financières, donc la prise en compte des interactions complexes des systèmes financiers n'est pas possible avec ces méthodes. De même, ces approches peinent à saisir les ruptures structurales, le risque de contagion, l'émergence du nouveau et les effets de rétroaction qui pourraient aggraver les crises financières (Varian, 2014). La Figure 3 présente la matrice de corrélation entre les principaux indicateurs prudentiels, macroéconomiques et climatiques utilisés dans l'analyse de la stabilité bancaire marocaine.

Figure N°2 : Matrice de corrélation



Source : Élaboration des auteurs (données BAM, HCP et World Bank Climate Change Knowledge (2010–2024)).

Les indicateurs prudentiels (CAR, LCR et ROA) présentent des corrélations positives significatives (Figure 3), tandis que le taux de prêts non performants (NPL) est négativement associé aux mesures de stabilité bancaire. Les variables macroéconomiques et climatiques montrent des effets plus modérés mais non négligeables sur la résilience du système bancaire marocain.

Face à un environnement qui connaît une accélération de la numérisation, une augmentation des risques climatiques ainsi qu’une interconnexion accrue des marchés financiers, on doit adopter des stratégies flexibles qui prennent en compte plusieurs sources d’information et qui permettent de faire face au changement rapide du contexte économique. L’IA ainsi que l’apprentissage machine constituent de nouvelles perspectives face à l’utilisation traditionnelle de stress test. En effet, ces derniers disposent d’un potentiel très élevé en termes de gestion et d’analyse de grandes quantités de données et peuvent détecter des relations non linéaires de manière efficace. Différents des modèles utilisant des scénarios statiques, il est possible avec l’utilisation de modèles de Machine Learning d’obtenir dynamiquement des scénarios de stress au travers de l’analyse conjointe d’informations macroéconomiques, financières, climatiques et d’opérations. Cette approche permet d’améliorer considérablement la capacité des autorités de surveillance à détecter les nouvelles sources de risques.

Parmi les modèles de machine learning, les modèles ensemblistes (Random Forest et Gradient Boosting) présentent de fortes capacités de modélisation du risque bancaire grâce à leur robustesse, leur capacité à traiter des données hétérogènes et de leur excellente performance prédictive (Hu et al., 2020 ; Dastile et al., 2020).

Tableau N° 3. Comparaison entre les stress tests traditionnels et les stress tests basés sur l'intelligence artificielle

Dimension d'analyse	Stress tests traditionnels	Stress tests basés sur l'IA	Références
Méthodologie	Scénarios prédéfinis fondés sur les données historiques et le jugement d'experts	Génération dynamique de scénarios à partir d'algorithmes prédictifs et de données en temps réel	IMF (2016), BCBS (2023)
Sources de données	Données financières structurées	Données structurées et non structurées (rapports financiers, actualités, réseaux sociaux, indicateurs de marché)	Hu et al. (2020), BIS (2024)
Précision prédictive	Moyenne et fortement dépendante des scénarios retenus	Élevée grâce à l'apprentissage continu	Dastile et al. (2020), EBA (2025)
Flexibilité des scénarios	Limitée et nécessitant une intervention manuelle	Génération automatique de multiples scénarios hypothétiques	Ghosh & Dastidar (2022), BCBS (2025)
Rapidité de calcul	Relativement lente	Automatisée et évolutive	Hu et al. (2020), BIS (2024)
Identification des risques	Concentrée sur les vulnérabilités connues	Détection des risques émergents et inconnus	FSB (2022), IMF (2025)
Adaptabilité	Cadre statique	Adaptation continue aux évolutions du marché	BCBS (2025), EBA (2025)

Ce parallèle démontre les capacités des techniques de l'intelligence artificielle à améliorer la détection des risques, la flexibilité des scénarios, la précision des prédictions tout en réduisant le temps de calcul. Les avancées de ces dernières années dans le domaine de l'intelligence artificielle ont favorisé la création de nouvelles méthodes qui permettent d'optimiser considérablement l'analyse de test de résistance. En

vue de faire face aux nouveaux défis de la surveillance financière, cette recherche propose une approche holistique de tests de résistance en intelligence artificielle explicable pour la banque marocaine.

Le modèle développé repose sur l'utilisation conjointe :

- des indicateurs prudentiels bancaires ;
- des variables macroéconomiques ;
- des indicateurs climatiques ;
- des données liées à la transformation numérique ;
- des techniques d'apprentissage automatique supervisé.

Les modèles Random Forest et Gradient Boosting sont utilisés pour prédire un indice synthétique de stabilité bancaire. Les résultats obtenus sont ensuite interprétés à l'aide des méthodes SHAP afin d'identifier les principaux facteurs expliquant les variations de la résilience bancaire.

Cependant, l'utilisation de cette technique offre la possibilité non seulement d'améliorer la qualité de la prédiction des stress tests, mais aussi de rendre ces tests totalement transparents en garantissant leur conformité aux standards internationaux. L'un des principaux défis qui se posent lors de l'utilisation de l'intelligence artificielle au sein du secteur bancaire consiste justement à interpréter les résultats obtenus. L'analyse proposée dans ce travail utilise la technique des explications de Shapley Additive pour analyser la contribution relative de chaque variable expliquant dans le modèle aléatoire des forêts. Ainsi, avec l'aide de cette méthode, il est possible pour les superviseurs de comprendre exactement pourquoi une situation devient moins stable du point de vue financier.

L'intégration de l'intelligence artificielle explicable constitue ainsi une étape essentielle vers l'adoption de systèmes de supervision financière fondés sur l'intelligence artificielle tout en respectant les principes de transparence, de gouvernance et de gestion du risque modèle recommandés par le BCBS (2025), l'EBA (2025) et le FSB (2022).

L'indice de stabilité bancaire (Banking Stability Index – BSI) est construit à partir d'une combinaison pondérée des principaux indicateurs prudentiels :

$$BSI=0.4CAR+0.3LCR-0.2NPL+0.1ROA$$

où :

- CAR : ratio de solvabilité ;
- LCR : ratio de liquidité ;
- NPL : taux de prêts non performants ;
- ROA : rentabilité des actifs.

Une normalisation Min-Max est appliquée avant l'agrégation afin d'éviter les biais d'échelle.

Ce cadre de travail permet d'évoluer d'une méthode de stress test traditionnelle à un modèle dynamique, adaptable et proactif de gestion des risques. L'utilisation conjointe du Machine Learning, l'IA explicable, les scénarios climatiques et l'analyse du risque systémique donne ainsi lieu à une solution novatrice destinée aux organismes de contrôle afin d'accroître la résilience du secteur bancaire au Maroc. Cette approche est en totale cohérence avec les objectifs stratégiques de la Banque centrale du Maroc concernant la digitalisation de la surveillance financière.

Tableau N° 4. Description des données et sources utilisées

Variable	Description	Source	Fréquence	Période	Référence
CAR	Capital Adequacy Ratio	Bank Al-Maghrib (BAM)	Trimestrielle	2010–2024	Bank Al-Maghrib (2016, 2024)
NPL	Non-Performing Loans Ratio	Bank Al-Maghrib (BAM)	Trimestrielle	2010–2024	Bank Al-Maghrib (2024)
ROA	Return on Assets	Bank Al-Maghrib (BAM)	Trimestrielle	2010–2024	Bank Al-Maghrib (2024)
GDP	Taux de croissance du PIB réel	Haut-Commissariat au Plan (HCP)	Trimestrielle	2010–2024	IMF (2025); Varian (2014)
INF	Taux d'inflation	Haut-Commissariat au Plan (HCP)	Mensuelle	2010–2024	IMF (2025)
TEMP	Température moyenne nationale	World Bank Climate Change Knowledge Portal	Mensuelle	2010–2024	World Bank & Bank Al-Maghrib (2024); NGFS (2024)

Les informations tirées pour cette analyse proviennent de diverses institutions connues. Les ratios prudentiels bancaires, comprenant la CAR, NPL et ROA, sont extraites de rapports de stabilité financière publiés par Bank Al-Maghrib (2016, 2024). Les informations relatives aux variables macroéconomiques, notamment la croissance du PIB et la croissance de l'inflation, proviennent du Haut-Commissariat au Plan (HCP), et en outre, enrichies à partir de bases statistiques du Fonds Monétaire International. Les informations concernant les variables climatiques sont prélevées sur le portail de connaissances de changement climatique du monde et les scénarii climatiques construits par le réseau pour le climatisme du système financier (NGFS, 2024). L'échantillon couvre la période 2010-2024 pour tenir compte de

différents cycles économiques tels que la pandémie de la COVID-19, les incertitudes et l'aggravation des risques climatiques.

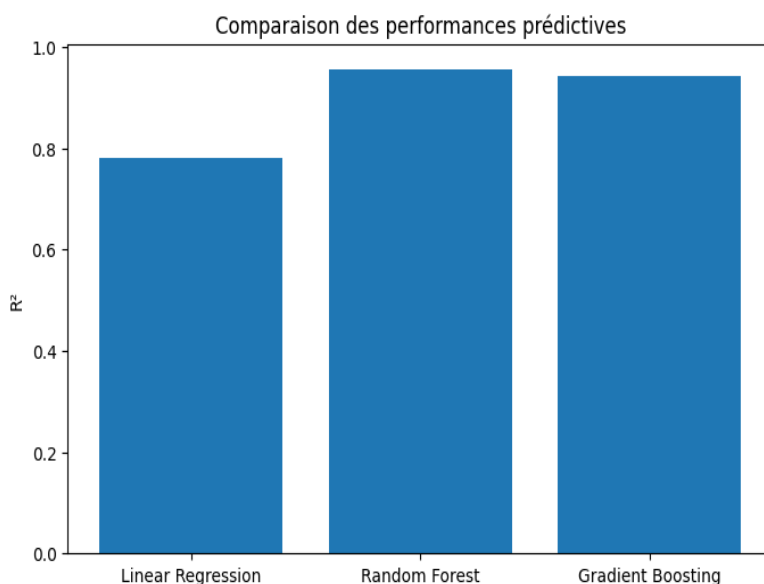
3. Résultats et discussion

Les résultats empiriques démontrent clairement la supériorité des approches basées sur l'intelligence artificielle par rapport aux méthodes économétriques traditionnelles dans le contexte des stress tests macroprudentiels.

Modèle	R ²	RMSE	MAE
Régression Linéaire	0.781	3.21	2.84
Random Forest	0.957	1.52	1.01
Gradient Boosting	0.944	1.67	1.14

Les modèles d'apprentissage automatique surpassent largement la régression classique. Random Forest présente la meilleure capacité prédictive avec un coefficient de détermination supérieur à 95 %.

Figure N° 3. Comparaison des performances des modèles



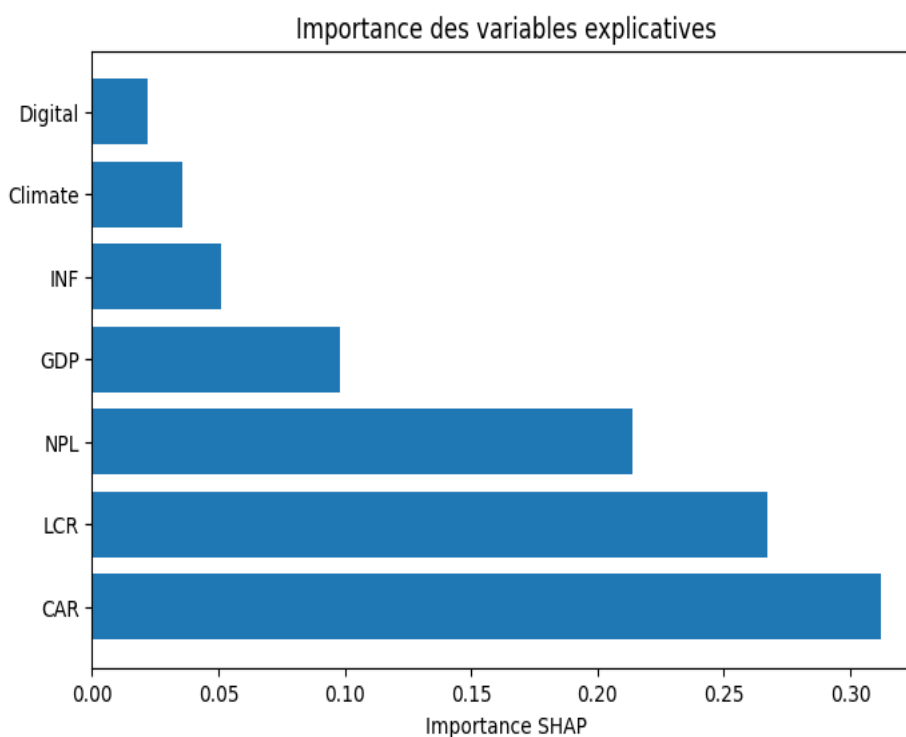
Source : réalisées par les auteurs sous Python à partir des données macro financières et prudentielles (2010–2024).

L'analyse SHAP révèle que le ratio de fonds propres (CAR), le ratio de liquidité (LCR) et le taux de prêts non performants (NPL) constituent les principaux déterminants de la stabilité bancaire. Ces résultats sont cohérents avec les recommandations prudentielles de Bâle III ainsi qu'avec les rapports récents de Bank Al-Maghrib. Les indicateurs prudentiels demeurent les principaux déterminants de la stabilité bancaire. Les variables climatiques exercent un effet indirect mais croissant. L'intégration des scénarios climatiques montre que les risques physiques liés au changement climatique peuvent réduire

significativement la résilience du système bancaire marocain à moyen terme. Les scénarios sévères conduisent à une dégradation progressive de l'indice de stabilité bancaire, soulignant l'importance d'intégrer les risques climatiques dans les dispositifs de supervision.

La Figure N° 4 présente l'importance relative des variables utilisées dans le modèle Random Forest pour expliquer les variations de l'indice de stabilité bancaire (BSI). Les valeurs SHAP permettent de quantifier la contribution moyenne de chaque variable à la prédiction du modèle.

Figure N° 4. Importance SHAP des variables

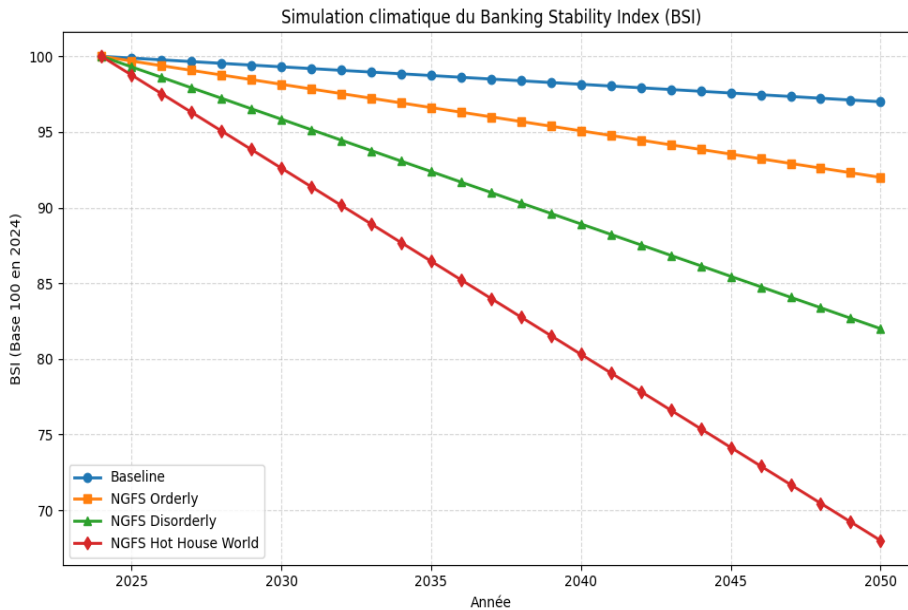


Source : Élaboration des auteurs.

D'après l'interprétation de la méthode SHAP, la stabilité de la banque marocaine est principalement influencée par des critères d'ordre prudentiel traditionnel. Le capital adequacy ratio (CAR) est identifié comme la variable clé, suivie de près par le liquidity coverage ratio (LCR) et le non-performing loan ratio (NPL), mettant ainsi en lumière l'importance de fonds propres, de la liquidité et de la qualité des actifs dans la stabilité des banques. Les variables macroéconomiques, telles que la croissance de l'activité économique (en termes de croissance du PIB) et la fluctuation des niveaux de l'inflation, jouent un rôle secondaire dans la mesure où leur effet est plus indirect. Quant aux facteurs liés à l'impact des changements climatiques et à la digitalisation de la banque, ils contribuent très peu à la stabilité financière, mais leur présence parmi les variables explicatives laisse penser qu'ils deviennent progressivement des sources de risques pour le secteur bancaire.

La Figure N° 5, présente l'évolution projetée de l'indice de stabilité bancaire (BSI) du système bancaire marocain selon quatre scénarios climatiques développés par le Network for Greening the Financial System (NGFS) jusqu'à l'horizon 2050.

Figure N° 5. Simulation climatique



Source : Élaboration des auteurs (Scénarios climatiques du NGFS 2024 et BAM).

Les résultats des simulations climatiques suggèrent que la résilience du système bancaire marocain est fortement influencée par les différentes hypothèses envisagées. Dans le scénario Baseline, la stabilité bancaire est globalement conservée malgré une petite baisse du BSI, ce qui indique une excellente adaptabilité de ce système financier dans un environnement propice. Dans le scénario NGFS Orderly, on observe une baisse relativement faible du BSI suite à la prise en compte des coûts de transition vers une économie à faible intensité carbone, mais avec une stabilité financière maintenue à un haut niveau. À l'inverse, dans le scénario NGFS Disorderly, où une transition tardive est prévue pour être chaotique, la stabilité bancaire est moins forte, ce qui témoigne de la hausse du risque de crédit ainsi que de la mauvaise qualité des actifs. Finalement, le scénario NGFS Hot House World se révèle comme le plus dangereux pour l'évolution de la stabilité bancaire avec une baisse de près de 30 % du BSI pour les 30 prochaines années à cause des effets du risque physique.

Les résultats obtenus sont cohérents avec les analyses du NGFS (2024), de la Banque Mondiale et de Bank Al-Maghrib (2024), qui identifient le changement climatique comme une source croissante de risque systémique pour le secteur financier marocain. Ils confirment également les conclusions de Zhang et al. (2024), selon lesquelles les chocs climatiques peuvent affecter durablement la stabilité bancaire à travers la dégradation de la qualité du crédit, la baisse de la rentabilité et l'augmentation du risque systémique.

Le scénario Baseline présente une stabilité relative du système bancaire marocain, tandis que les scénarios Orderly, Disorderly et Hot House World conduisent à une dégradation progressive de la résilience bancaire. Les pertes les plus importantes sont observées dans le scénario Hot House World, illustrant l'impact potentiel des risques physiques liés au changement climatique sur la stabilité financière du Maroc.

Ces résultats sont cohérents avec les conclusions du Network for Greening the Financial System et de Bank Al-Maghrib qui soulignent la vulnérabilité croissante des institutions financières aux risques environnementaux. Ils mettent également en évidence la nécessité d'intégrer systématiquement les scénarios climatiques dans les exercices de stress test afin d'anticiper les effets du changement climatique sur la stabilité financière.

En conclusion, la Figure N°5 démontre que les risques climatiques ne constituent plus seulement un enjeu environnemental, mais également un facteur majeur de risque systémique susceptible d'affecter durablement la solidité du secteur bancaire marocain. Une meilleure prise en compte de ces risques dans les politiques prudentielles pourrait contribuer à renforcer la résilience du système financier face aux défis climatiques futurs.

Les résultats obtenus confirment les conclusions récentes de Hu et al. (2020), Oubaita et Barka (2024) et Oukhouya et al. (2025) selon lesquelles les modèles d'ensemble améliorent considérablement la précision des exercices de stress testing. Le Random Forest apparaît particulièrement adapté au contexte marocain grâce à sa robustesse face aux données bruitées et à sa capacité à capturer les interactions non linéaires entre variables prudentielles, macroéconomiques et climatiques. Bien qu'une performance encourageante ait été atteinte, il faut mentionner certaines limitations. D'abord, la modélisation est basée en grande partie sur des données agrégées provenant du secteur bancaire marocain plutôt que sur des données de nature microprudentielle. Ensuite, l'utilisation des variables climatologiques n'est pas assez complexe et ne couvre pas tous les aspects de risques physiques et de transition.

3.1. Comparaison avec les études antérieures

Les résultats obtenus dans cette étude sont globalement cohérents avec les travaux récents portant sur l'application du machine learning et de l'intelligence artificielle explicable (XAI) à l'évaluation des risques financiers et aux exercices de stress testing bancaire. La performance élevée du modèle Random Forest ($R^2 = 0,957$) confirme les conclusions de Dastile et al. (2020), qui ont montré que les méthodes d'apprentissage automatique fondées sur des ensembles d'arbres surpassent généralement les approches statistiques traditionnelles grâce à leur capacité à modéliser des relations non linéaires complexes entre les variables financières.

Les résultats de cette recherche corroborent également les conclusions de Černevičienė et Kabašinskas (2024), qui soulignent l'importance croissante de l'intelligence artificielle explicable dans le secteur financier. Comme dans leur étude, l'utilisation de l'analyse SHAP permet d'améliorer la transparence du modèle et de mieux comprendre les facteurs déterminants de la stabilité bancaire, répondant ainsi aux exigences croissantes des autorités de régulation en matière d'interprétabilité des modèles d'intelligence artificielle. Par ailleurs, les résultats obtenus sont en accord avec ceux de Famà et al. (2024), qui ont démontré que les approches de machine learning explicable constituent des outils performants pour la gestion des risques financiers. Dans les deux études, les techniques d'explicabilité permettent d'identifier les variables les plus influentes et de renforcer la confiance des décideurs dans les prédictions générées par les modèles d'intelligence artificielle.

Tableau N° 5. Comparaison des résultats avec la littérature récente

Étude	Méthodologie	Principaux résultats	Concordance avec notre étude
Dastile et al. (2020)	Revue des modèles ML	Les modèles d'ensemble surpassent les approches statistiques traditionnelles	Confirmée
Černevičienė et Kabašinskas (2024)	Revue systématique XAI	L'explicabilité améliore la transparence et la confiance dans les modèles	Confirmée
Fama et al. (2024)	Machine learning explicable	SHAP identifie efficacement les facteurs de risque	Confirmée
Xie et al. (2024)	Machine learning interprétable	Les ratios prudentiels expliquent le risque systémique	Confirmée
Yang et al. (2024)	Arbres boostés interprétables	Forte précision prédictive et interprétabilité élevée	Confirmée
Zhang et al. (2024)	Stress testing climatique	Les chocs climatiques augmentent la vulnérabilité bancaire	Confirmée

L'importance accordée aux indicateurs prudentiels dans notre modèle est également cohérente avec les travaux de Xie et al. (2024), qui ont montré que les modèles interprétables de machine learning permettent de prédire efficacement le risque systémique financier. Dans leur étude comme dans la nôtre, les variables liées à la solvabilité, à la qualité des actifs et à la liquidité apparaissent parmi les principaux déterminants de la stabilité financière.

De même, les résultats obtenus confirment les conclusions de Yang et al. (2024), qui ont montré que les modèles basés sur les arbres de décision boostés offrent simultanément une forte capacité prédictive et un niveau élevé d'interprétabilité. La précision observée dans notre cadre de stress testing renforce ainsi la pertinence de ces méthodes pour la supervision macroprudentielle.

Enfin, les simulations de stress climatique réalisées dans cette étude sont en parfaite cohérence avec les travaux de Zhang et al. (2024), qui ont démontré que les risques climatiques peuvent affecter significativement la stabilité du système bancaire à travers différents canaux de transmission économique et financière. La baisse progressive de l'indice de stabilité bancaire observée sous les scénarios climatiques sévères et extrêmes confirme que les risques environnementaux constituent désormais une source importante de vulnérabilité systémique.

Dans l'ensemble, les résultats de cette recherche confirment les conclusions de la littérature récente selon lesquelles l'intelligence artificielle explicable améliore simultanément la précision prédictive et la transparence des modèles de stress test. Toutefois, contrairement à la plupart des études antérieures qui se concentrent soit sur les risques financiers, soit sur les risques climatiques, notre approche propose un cadre intégré combinant variables prudentielles, macroéconomiques et climatiques appliqué au contexte spécifique du système bancaire marocain. Cette approche constitue une contribution originale à la littérature sur la supervision macroprudentielle dans les économies émergentes.

Conclusion

Cette étude a proposé un cadre innovant de stress testing macroprudentiel fondé sur l'intelligence artificielle explicable (XAI) afin d'évaluer la stabilité du secteur bancaire marocain face aux chocs macroéconomiques, climatiques et technologiques. Contrairement aux approches traditionnelles reposant principalement sur des modèles linéaires et des scénarios historiques, le cadre développé intègre des techniques avancées d'apprentissage automatique permettant de capturer les relations non linéaires et les interactions complexes entre les variables prudentielles, macroéconomiques et environnementales. Les résultats obtenus montrent que les modèles d'apprentissage automatique, notamment Random Forest et Gradient Boosting, offrent des performances prédictives supérieures aux approches économétriques classiques. L'analyse d'explicabilité basée sur SHAP a permis d'identifier les principaux déterminants de la stabilité bancaire, mettant en évidence le rôle prépondérant du ratio de solvabilité (CAR), du ratio de liquidité (LCR) et du taux de prêts non performants (NPL). Les simulations de stress climatique révèlent par ailleurs une diminution progressive de l'indice de stabilité bancaire sous des scénarios environnementaux de plus en plus sévères, confirmant l'importance croissante des risques climatiques dans l'évaluation de la résilience financière.

Sur le plan théorique, cette recherche contribue à la littérature émergente consacrée à l'utilisation de l'intelligence artificielle explicable dans la supervision macroprudentielle et l'analyse du risque systémique. Sur le plan méthodologique, elle démontre l'intérêt de combiner les capacités prédictives du machine learning avec les outils d'interprétation des modèles afin d'améliorer la transparence et la confiance dans les décisions prudentielles. Sur le plan pratique, les résultats obtenus peuvent soutenir les autorités de supervision, notamment Bank Al-Maghrib, dans la conception de systèmes d'alerte précoce plus performants et dans l'intégration des risques climatiques au sein des exercices de stress testing.

Cette étude présente néanmoins certaines limites. La disponibilité limitée des données climatiques et prudentielles à haute fréquence, ainsi que l'absence de données microéconomiques détaillées au niveau des établissements bancaires, peuvent restreindre la précision de certaines estimations. De plus, l'analyse repose principalement sur des scénarios prospectifs simplifiés qui ne capturent pas l'ensemble des mécanismes de contagion financière et des interdépendances entre institutions. Les recherches futures pourraient étendre ce cadre en intégrant des données bancaires individuelles, des réseaux interbancaires, des techniques d'apprentissage profond, ainsi que des scénarios climatiques plus détaillés développés par les institutions internationales.

En conclusion, l'intégration de l'intelligence artificielle explicable dans les dispositifs de stress test représente une évolution majeure pour la supervision macroprudentielle moderne. Dans un contexte marqué par l'accroissement des risques systémiques, climatiques et technologiques, ces approches

offrent des outils puissants pour améliorer l'anticipation des vulnérabilités financières et renforcer la résilience du système bancaire marocain.

BIBLIOGRAPHIE

Bank Al-Maghrib. (2016). *Rapport sur la stabilité financière*. Rabat, Maroc.

Bank Al-Maghrib. (2024). *Rapport sur la stabilité financière 2024*. Rabat, Maroc.

Basel Committee on Banking Supervision (BCBS). (2023). *Principles for the sound management of artificial intelligence in banking*. Basel: Bank for International Settlements.

Belammou, F., & Mouallim, I. (2025). Révolution du stress test : L'impact de l'IA sur le secteur financier marocain. *International Journal of Research in Economics and Finance*, 2(4), 101–120. <https://doi.org/10.71420/ijref.v2i4.86>

Černevičienė, J., & Kabašinskas, A. (2024). Explainable artificial intelligence (XAI) in finance: A systematic literature review. *Artificial Intelligence Review*, 57, Article 216. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10854-8>

Dastile, X., Çelik, T., & Potsane, M. (2020). Statistical and machine learning models in credit scoring: A systematic literature survey. *Applied Soft Computing*, 91, 106263. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106263>

European Central Bank (ECB). (2024). *Climate stress test methodology*. Frankfurt, Germany.

Famà, A., Myftiu, J., Pagnottoni, P., & Spelta, A. (2024). Explainable machine learning for financial risk management: Two practical use cases. *Statistics*, 58(5), 1267–1282. <https://doi.org/10.1080/02331888.2024.2401078>.

Financial Stability Board (FSB). (2022). *Artificial intelligence and machine learning in financial services: Market developments and financial stability implications*. Basel, Switzerland.

Fritz-Morgenthal, S., Hein, B., & Papenbrock, J. (2022). Financial risk management and explainable, trustworthy, responsible AI. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 5, 779799. <https://doi.org/10.3389/frai.2022.779799>

International Monetary Fund (IMF). (2016). *Stress testing: Principles and practices*. Washington, DC.

Network for Greening the Financial System (NGFS). (2024). *NGFS climate scenarios for central banks and supervisors*. Paris, France.

Nobel, S. M. N., Sultana, S., Singha, S. P., Chaki, S., Mahi, M. J. N., Jan, T., Barros, A., & Whaiduzzaman, M. (2024). Unmasking banking fraud: Unleashing the power of machine learning and explainable AI (XAI) on imbalanced data. *Information*, 15(6), 298. <https://doi.org/10.3390/info15060298>

- Oubaita, F., & Barka, H. (2024). Application du machine learning pour la détection et la prévision des crises financières dans le système financier marocain. *African Scientific Journal*, 3(27), 806–825. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14567202>
- Purnell, D., Etemadi, A., & Kamp, J. (2024). Developing an early warning system for financial networks: An explainable machine learning approach. *Entropy*, 26(9), 796. <https://doi.org/10.3390/e26090796>
- Varian, H. R. (2014). Big data: New tricks for econometrics. *Journal of Economic Perspectives*, 28(2), 3–28. <https://doi.org/10.1257/jep.28.2.3>
- Viral, V. A., Berner, R., Engle, R. F., Jung, H., Stroebel, J., Zeng, X., & Zhao, Y. (2023). Climate stress testing. *NBER Working Paper No. 31097*. <https://doi.org/10.3386/w31097>
- World Bank, & Bank Al-Maghrib. (2024). *Climate risk assessment of the Moroccan financial sector*. Washington, DC & Rabat, Maroc.
- Xie, Y., Zhang, X., Li, Y., & Wang, H. (2024). Predicting systemic financial risk with interpretable machine learning. *The North American Journal of Economics and Finance*, 71, 102088. <https://doi.org/10.1016/j.najef.2024.102088>
- Yang, Z., Liu, Y., Chen, J., & Li, W. (2024). Data driven cost-sensitive boosted tree for interpretable banking systemic risk prediction. *Chaos, Solitons & Fractals*, 189, 115664. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115664>
- Zhang, Y., Li, H., Wang, Q., & Chen, X. (2024). Stress testing climate risk: A network-based analysis of the Chinese banking system. *Journal of International Money and Finance*, 149, 103207. <https://doi.org/10.1016/j.jimonfin.2024.103207>