

ÉTUDE DE DOSSIER

Cadre de direction 2025

Face à l'intensification des événements climatiques extrêmes et à la dégradation accélérée de la nature, les banques centrales et les superviseurs financiers sont de plus en plus appelés à prendre en compte ces risques systémiques dans leurs modèles, leurs analyses et leurs instruments. Ces risques remettent en question les fondements mêmes des cadres macro-financiers traditionnels, fondés sur la linéarité, la certitude probabilisable et l'horizon de moyen terme. Intégrer efficacement ces dimensions implique de composer avec une incertitude radicale, des effets de seuil, des dynamiques non linéaires et des horizons longs.

Dans ce contexte, plusieurs banques centrales, notamment à travers les travaux du NGFS, de la BCE ou de la Banque d'Angleterre, explorent de nouveaux scénarios, méthodes de stress-testing et indicateurs pour évaluer l'impact du climat et de la nature sur la stabilité financière et la politique monétaire. Ce tournant méthodologique soulève à la fois des défis techniques, des choix de gouvernance et des débats de légitimité quant au périmètre d'action des institutions monétaires.

À partir des documents ci-joints, vous répondrez aux questions suivantes :

1. Quels sont les types de risques climatiques ou liés à la nature que les banques centrales doivent désormais prendre en compte ? Les banques centrales ont-elles besoin d'un mandat élargi pour intégrer ces enjeux ?
2. Pourquoi les modèles traditionnels des banques centrales ne permettent pas d'appréhender ces risques ? Quels sont les défis méthodologiques rencontrés par les banques centrales pour modéliser les risques liés au climat et à la nature ?
3. Qu'est-ce qu'un scénario de stress climatique et quels en sont les apports d'un point de vue de supervision ?
4. Quels sont les enjeux de la modélisation des risques climat et nature du point de vue des institutions financières ?
5. Would the integration of climate and nature related risks into financial supervision affect market neutrality? Is it desirable? Provide a rationale and concrete examples. (*Réponse à rédiger en langue anglaise*)

Les questions sont indépendantes ; nous vous recommandons toutefois de les traiter dans l'ordre. Il n'est pas nécessaire de recopier l'intitulé des questions.

Les réponses doivent être rédigées en langue française (à l'exception de la question n° 5).

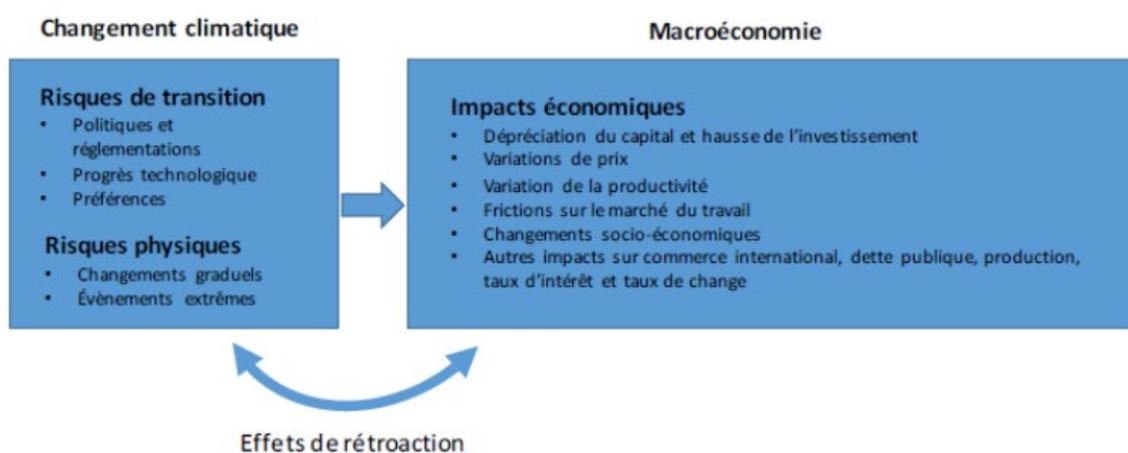
Une attention particulière sera portée à la qualité de la rédaction.

LISTE DES DOCUMENTS JOINTS

1. **Les défis de la modélisation du climat pour les banques centrales**
www.banque-france.fr – 16/06/2022 – 3 pages
2. **Tests de scénarios climatiques : ce que les sociétés financières doivent savoir**
www.deloitte.com – 06/04/2023 – 5 pages
3. **Les enjeux de modélisation pour évaluer l'impact macroéconomique de la transition climatique**
www.strategie-plan.gouv.fr – Novembre 2022 – 9 pages
4. **Climate macroeconomic modelling handbook**
www.ngfs.net – October 2024 – 5 pages
5. **Making macroeconomic and financial models work for climate risk regulation and resilient banking**
<https://thedocs.worldbank.org> – May 2025 – 6 pages
6. **L'impact du risque climatique sur la modélisation de la Probabilité de Défaut**
<https://atheia.fr> – 8 pages
7. **Climate Risk Macroeconomic Forecasting**
www.economy.com – January 2021 – 11 pages
8. **Il convient d'élargir, dans un cadre rigoureux, le champ des missions de la BCE à l'atténuation climatique**
www.lemonde.fr – 03/05/2024 – 2 pages
9. **La Banque de France lance un consortium de modélisation macroéconomique sur les risques liés à la nature**
www.banque-france.fr – 20/05/2025 – 1 page
10. **Comment modéliser le risque de transition ?**
www.caissedesdepots.fr – Septembre 2024 – 10 pages
11. **Événements naturels : la modélisation au défi du changement climatique**
www.argusdelassurance.com – 05/06/2024 – 3 pages

Les défis de la modélisation du climat pour les banques centrales

Billet n°274. La modélisation occupe une place importante dans le plan d'action de l'Eurosystème sur le changement climatique. L'analyse macroéconomique et la préparation des décisions de politique monétaire reposent en effet sur des travaux quantitatifs où les modèles jouent un rôle central.



Graphique 1 : Impacts économiques du changement climatique

Source : *Analyse des auteurs*

Changement climatique et enjeux en termes de modélisation

Dans le cadre de sa revue stratégique de politique monétaire, le Conseil des gouverneurs de la BCE s'est fermement engagé à intégrer davantage les considérations relatives au changement climatique dans son cadre de politique monétaire. Le développement de nouveaux modèles permettra de mieux suivre les implications économiques et financières du changement climatique et des politiques de transition, et leur impact sur la transmission de la politique monétaire (cf. BCE (2021)).

Il est en effet impératif que les banques centrales approfondissent leur compréhension des effets du changement climatique sur les prix comme sur la croissance, à la fois sur le cycle économique et sur des horizons temporels beaucoup plus longs.

Un plan d'action concret pour les projections macroéconomiques

L'Eurosystème s'est en particulier penché sur le cas des prévisions macroéconomiques à l'horizon de 3 ans, produites chaque trimestre et souvent décisives pour la prise de décision monétaire. Les trajectoires de PIB et d'inflation sont au cœur de ces exercices, qui vont dans un assez grand degré de détail (consommation, investissement, chômage ; inflation totale versus hors énergie et alimentation ; etc.) ainsi qu'une évaluation du potentiel de croissance à 10 ans. Malgré l'horizon relativement court des projections, ignorer les conséquences du changement climatique serait une erreur. La montée en charge des politiques de transition ou l'augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes peuvent en effet affecter la trajectoire de

l'économie européenne sur les 3 ou 4 prochaines années, en particulier si ces politiques affectent par ailleurs le PIB potentiel de long terme.

Les effets macroéconomiques de certaines politiques de transition, par exemple la mise en place d'un prix du carbone, de subventions à l'investissement privé ou de dépenses publiques figurant dans les plans budgétaires des États, sont déjà couvertes par les projections.

En revanche, les changements en termes de réglementation ou de comportements sont plus difficiles à évaluer. Concernant les événements climatiques extrêmes, non prédictibles par nature, il s'agit plutôt de se doter des moyens de les analyser quand ils surviennent. Enfin, déterminer si les risques physiques de long terme, comme la hausse des températures, induisent des changements structurels significatifs à l'horizon de 3 ans reste une question ouverte.

L'Eurosystème a engagé 5 actions visant à améliorer la prise en compte du changement climatique dans les projections :

- mieux évaluer les effets sur les prix le long des chaînes de production du système de quotas EU-Emissions Trading System (EU-ETS), l'outil-clé pour la gestion de la réduction des émissions de dioxyde de carbone ;
- évaluer l'impact spécifique des politiques climatiques sur le PIB et l'inflation, par exemple les investissements inclus dans le cadre de plan NGEU ;
- renforcer les outils de projection des prix de l'énergie en Europe, en ayant une meilleure description de la formation de ces prix sur les marchés de gros et leur transmission aux consommateurs finaux ;
- examiner les conséquences des risques physiques et des politiques de transition sur les tendances longues, notamment sur la tendance de productivité et l'accumulation du capital ;
- analyser les risques autour de la projection centrale, aussi bien les risques d'événements climatiques extrêmes, à la probabilité faible mais aux conséquences importantes, que les aléas liés au déploiement des politiques de transition.

Quelle stratégie de développement des modèles de banques centrales ?

L'Eurosystème a pour objectif de développer des outils pour la prise en compte des questions climatiques dans les projections, mais aussi plus globalement pour l'analyse de scénarios.

S'il existe déjà un certain nombre de modèles quantitatifs, connus sous le nom de modèles d'évaluation intégrée (IAM) qui lient système climatique et évolutions économiques, ces modèles ont des représentations très simplifiées de l'économie, la plupart des canaux de transmission étant absents et les rétroactions entre climat et macroéconomie restant limitées. De plus, ces modèles ont tendance à modéliser indépendamment les canaux de risque physique et de transition et ne rendent pas compte des implications macroéconomiques sur l'inflation, des composantes du PIB ou de l'emploi, variables nécessaires à l'analyse des banques centrales.

Certaines banques centrales (dont la Banque de France) et institutions financières ont commencé à développer des outils pour mieux comprendre les effets macroéconomiques des risques climatiques (dans le cadre, par exemple, du Network for Greening the Financial System (NGFS)). À court terme, la stratégie pour intégrer les relations entre modèles climatiques et modèles macroéconomiques est celle de la « suite de modèles » qui permet de traduire des scénarios climatiques obtenus à partir de modèles climatiques, de type IAMs, en variables macroéconomiques, sectorielles et financières (voir, par exemple, Allen et al., 2020).

À plus long terme, les risques liés au climat doivent également être inclus dans les modèles au cœur de l'analyse des banques centrales afin de tenir compte de leurs interactions avec d'autres risques plus classiques à l'horizon habituel de la politique monétaire. Ceci implique une modification des principaux modèles de référence, notamment les modèles semi-structurels, au cœur des exercices de prévision et de simulation de scénarios alternatifs aux mêmes horizons, et certains modèles d'équilibre général dynamiques et stochastiques (DSGE). Dans tous les cas, pour mieux refléter les risques liés au climat, les modèles de banques centrales devront progressivement être dotés de nouveaux mécanismes qui pourraient devenir clés. Outre la prise en compte des instruments spécifiques à l'atténuation du changement climatique (comme par exemple les quotas d'émission du carbone), il faudra approfondir l'examen de l'impact du secteur énergétique sur la dynamique économique, y compris sur le commerce international, la valorisation de certains actifs financiers et si possible de nouveaux canaux macro-financiers internationaux. Au-delà de l'horizon de la politique monétaire, il est important d'évaluer l'impact du risque climatique sur la croissance potentielle et ses conséquences pour la stabilité des prix.

Jean-François Ouvrard
Pierre-François Weber

Tests de scénarios climatiques : ce que les sociétés financières doivent savoir

À partir de 2024, les rapports sur le climat seront obligatoires pour les grandes entreprises en Suisse. Bien que les régulateurs et les autorités de surveillance financière du monde entier devraient exiger une analyse des scénarios liés au climat pour les rapports et les cadres de risque, la plupart des banques n'intègrent pas actuellement de tests de résistance au risque climatique dans leurs modèles. Les institutions financières qui négligent ces risques supporteront probablement une charge financière importante liée au changement climatique et s'exposeront à des interventions réglementaires, à l'activisme des actionnaires ou à des litiges liés au climat.

L'analyse de scénarios liés au climat est exigée par un nombre croissant de cadres d'information financière et de risques, tels que la Taskforce for Climate-related Financial Disclosures (TCFD). L'exploration de scénarios climatiques à long terme à travers une gamme de risques physiques et de transition peut sembler intimidante pour les banques, les réassureurs et les fonds de pension et dépasser leurs capacités internes immédiates. Cependant, il est possible d'utiliser les recherches publiquement disponibles sur le changement climatique (du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC) et ses effets attendus sur l'économie (du Network for Greening the Financial System, NGFS). Combinées aux tests de stress climatique déjà mis en œuvre par diverses banques centrales et autorités de surveillance financière, elles peuvent aider à dériver les impacts financiers potentiels sur une institution financière donnée (figure 1).

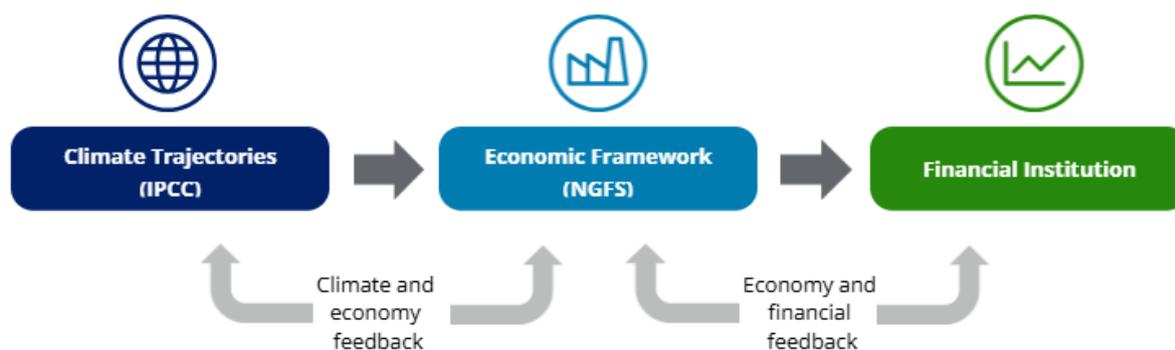


Figure 1. Schematic view of climate driven economic frameworks ultimately transmitting climate-risks to individual financial institutions. Climate driven physical and transition risk models from the IPCC (such as Representative Concentration Pathways and shared Socioeconomic Pathways) provide the foundation for the NGFS economic framework. Climate transition pathways are generated from IPCC climate trajectories using Integrated Assessment Models (IAMs) which provide energy- and emission-related variables and temperature alignment with physical risk models. The physical risk impacts are generated by Earth system and climate impact models (chronic risk) and natural catastrophe models (acute impact) to derive changes in country productivity and asset values. These climate-economic inputs feed into the NGFS framework of macro-financial impacts, after which each financial institution can apply their own methodology to derive the relevant financial variables from the macroeconomic models.

Une forte pression réglementaire

Les recommandations de la TCFD ont inspiré des directives réglementaires dans le monde entier, y compris en Suisse, où les rapports sur le climat seront obligatoires pour les grandes entreprises à partir de 2024. L'une de ces recommandations est que les institutions financières traitent les risques climatiques comme des risques financiers. Pour évaluer les risques et les opportunités liés

au climat pour les entreprises, l'accent est mis sur les tests de résistance et l'analyse de scénarios afin d'évaluer l'impact du changement climatique futur sur les finances¹. L'International Sustainability Standards Board (ISSB) a également voté en novembre 2022 que les entreprises sont tenues d'utiliser l'analyse de scénarios liés au climat pour rendre compte de la résilience climatique et pour identifier les risques liés au climat. Les régulateurs et les autorités de surveillance financière du monde entier devraient étendre leurs exigences à l'analyse de scénarios liés au climat, mais une enquête menée par la Banque centrale européenne (BCE) a montré qu'environ 60 % des banques n'intègrent pas actuellement les tests de résistance au risque climatique dans leurs cadres et modèles de test².

Cadres de scénarios climatiques accessibles au public

Le NGFS est un réseau de plus de 100 banques centrales et autorités de surveillance financière qui partagent les meilleures pratiques et contribuent au développement durable du secteur financier³. Ils ont développé une série de scénarios qui incluent les données macro-financières les plus complètes disponibles pour évaluer les risques financiers liés à l'environnement et au climat. Les scénarios du NGFS aident à mobiliser le financement général pour soutenir la transition vers une économie plus durable. La troisième série de scénarios NGFS, publiée en 2022, offre des données actualisées, une granularité sectorielle améliorée et une intégration plus approfondie des risques physiques (y compris la baisse des prix des énergies renouvelables et des coûts d'atténuation).

Les différents scénarios sont modélisés à l'aide de modèles macroéconomiques et financiers liés au climat, explorant un large éventail de scénarios de transition et de risques physiques dans différentes régions et différents secteurs. Ces modèles sont pilotés par des changements temporels et régionaux dans les politiques (plus particulièrement dans les prix du carbone, les changements dans les prix de l'énergie dans les secteurs des énergies fossiles et renouvelables, et les augmentations des prix des matières premières), les taux de changement technologique (par exemple, la décarbonisation des industries lourdes) et l'utilisation des technologies d'élimination du dioxyde de carbone. Le changement climatique est une nouvelle source de risque dans ces scénarios, mais il se manifeste toujours par des facteurs de risque préexistants (dommages physiques, dépréciation des actifs, etc.).

Bien que ces scénarios exploratoires ne soient pas des prévisions, ils fournissent un cadre commun pour identifier les risques futurs et préparer le système financier à des chocs potentiels sur la base d'avenirs plausibles pour les risques financiers. Les scénarios du NGFS explorent en particulier les futurs potentiels suivants :

1. des scénarios ordonnés dans lesquels les politiques climatiques sont immédiates et progressivement plus strictes, limitant ainsi les risques physiques et de transition ;
2. des scénarios désordonnés dans lesquels les politiques sont retardées et abruptes ou ne sont pas coordonnées entre les pays et les secteurs, ce qui entraîne des risques de transition plus élevés ; et
3. les scénarios du monde de la serre chaude, dans lesquels les efforts mondiaux insuffisants n'atténuent pas le réchauffement climatique, ce qui entraîne des risques physiques graves (figure 2).

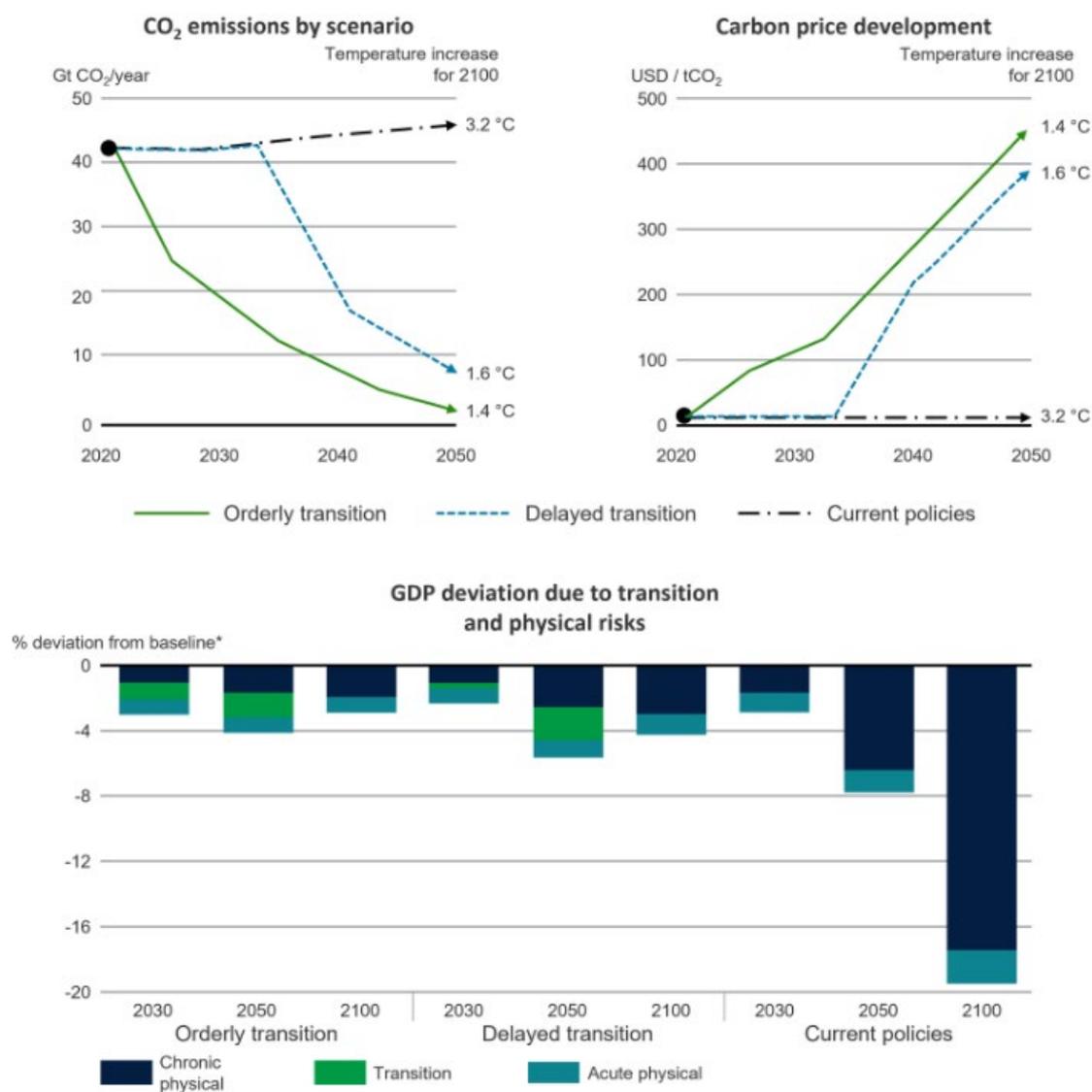


Figure 2. NGFS orderly, disorderly (delayed), and hot house world (current policies) scenarios depicted by CO₂ emissions, carbon price development, and implications on GDP.

The NGFS produces several variations of the orderly, disorderly, and hot house world transition and temperature scenarios that have been simplified into three general conditions in the figure. For the orderly transition scenario, long term physical risks in terms of GDP loss are significantly limited by short- and mid- term transition losses. In contrast, the current policies scenario develops similar GDP losses in the short term, but the physical risks in the mid- to long term significantly outweigh the transition risks of either the orderly and disorderly transition scenarios.

*The baseline is a hypothetical scenario with neither transition nor physical risks.

À quoi ressemblera la transition climatique ?

Le NGFS souligne qu’une transition immédiate, coordonnée et ordonnée en matière de carbone sera moins coûteuse que l’inaction ou des transitions soudaines et désordonnées à moyen et long terme. La poursuite des politiques actuelles ou l’utilisation de scénarios de contribution déterminés au niveau national (scénarios de la maison chaude) entraîneront les risques physiques les plus importants et les incidences négatives les plus marquées sur le PIB à partir de 2040 environ. Si l’on n’adopte pas les mesures nécessaires pour modifier les politiques actuelles, les risques physiques auront une incidence d’environ 20 % du PIB d’ici à 2100. En revanche, une

transition ordonnée pourrait limiter les pertes économiques dues au risque de transition à environ 4 % du PIB d'ici la fin du siècle. Dans tous les scénarios, les risques physiques l'emportent désormais sur les risques de transition, et leurs répercussions sur les institutions financières toucheront plus directement les compagnies d'assurance en raison des indemnités versées pour les dommages, en plus de la dépréciation de la valeur des actifs et des cas de défaillance qui affectent toutes les institutions financières.

Bien que les critiques des scénarios NGFS suggèrent que l'impact réel sur les risques physiques est sous-estimé parce que les modèles ne tiennent pas encore compte des perturbations potentiellement massives du comportement humain et des systèmes naturels (points de basculement sociaux et physiques), l'analyse des scénarios de risques climatiques est toujours impérative pour que les institutions financières se préparent à l'avenir, et les scénarios NGFS restent une norme largement acceptée par l'industrie.

En outre, notre propre analyse indique que les institutions financières du monde entier ont différents niveaux d'exposition au risque de changement climatique en fonction de ces facteurs clés :

- Le **(sous-)secteur économique** joue un rôle majeur dans la détermination des actifs et passifs correspondants les plus exposés au risque de changement climatique en raison des différences d'intensité des émissions.
- L'**exposition géographique** des actifs et des passifs est démontrée à la fois par la façon dont le climat régional changera en raison de la situation physique du pays ou de la région, et par les différences d'investissement dans l'adaptation au climat dans les différentes zones géographiques.
- Les **classes d'actifs** les plus exposées en termes d'obligations, d'actions ou d'immobilier varient également d'une institution financière à l'autre (banque, assureur, fonds de pension).

Pour parvenir à une transition nette zéro ordonnée, tous les secteurs de l'économie devront contribuer à une stratégie de transition ambitieuse. Les flux d'investissement doivent être orientés de manière significative vers les énergies renouvelables et les technologies d'élimination du dioxyde de carbone, ce qui nécessite une action politique et une innovation technologique ambitieuses et immédiates. Bien que l'action requise soit ambitieuse, de nombreuses options disponibles aujourd'hui dans tous les secteurs offrent un potentiel substantiel de réduction des émissions nettes d'ici à 2030 et plusieurs technologies sont déjà économiquement favorables sur les marchés actuels des prix du carbone⁴.

Utiliser les tests de résistance pour mettre en œuvre l'analyse des scénarios climatiques

Plusieurs grandes banques centrales et autorités de surveillance financière (CBFS), telles que la Banque nationale des Pays-Bas, la Banque d'Angleterre ou la Banque centrale européenne, ont commencé à effectuer leur propre analyse à l'aide des scénarios, des rapports et du cadre du NGFS, en se concentrant sur les principaux objectifs politiques dans leur juridiction⁵. Alors que l'analyse des scénarios de risques climatiques s'est d'abord concentrée sur l'évaluation des implications macroéconomiques « descendantes » au niveau régional ou national, les institutions financières individuelles ont également commencé leurs propres évaluations « ascendantes » de leurs actifs et de leur bilan, souvent dans le contexte des tests de résistance des autorités de surveillance. Les institutions financières européennes ont d'abord ouvert la voie et la Réserve fédérale américaine leur a emboîté le pas avec son propre exercice pilote mené par les six plus grandes banques américaines, qui sera publié dans le courant de l'année.

La première étape pour toute société financière consiste à évaluer son état de préparation et sa capacité à appliquer un cadre de simulation de crise climatique en termes de données (en trouvant les bons indicateurs de données si nécessaire), de gouvernance, de risque et de stratégie, et à déterminer si un soutien externe est nécessaire. L'étape suivante consiste à quantifier leur exposition aux risques physiques et de transition liés au climat, en évaluant les cas où ces risques peuvent être importants et justifier une analyse quantitative plus poussée. Enfin, les banques, les réassureurs ou les fonds de pension doivent procéder à l'évaluation quantitative proprement dite des incidences financières potentielles dans le cadre de différents scénarios climatiques⁶.

Les institutions financières se trouvent à des niveaux de préparation très différents pour réaliser leurs propres projections de scénarios climatiques, en fonction de leur taille, de leur modèle d'entreprise et de leur niveau de sophistication. Si elles rencontrent des difficultés à un stade quelconque du processus décrit ci-dessus, les tests de résistance climatique détaillés des banques centrales et des autorités de surveillance financière du monde entier peuvent être utilisés pour étayer les projections de l'entreprise et compléter le corpus d'analyses de scénarios de plus haut niveau produit par le GIEC et le NGFS. Les tests de résistance climatique effectués par les autorités de surveillance peuvent aider les institutions financières à combler le fossé entre les résultats généraux des projections macroéconomiques et les données spécifiques requises par leurs propres modèles financiers internes.

Perspectives

Les institutions financières doivent agir et évaluer leur résistance aux risques climatiques. La compréhension des risques climatiques permettra à votre entreprise de prendre des décisions fondées sur des données concernant les politiques et les investissements en matière de climat, ce qui ouvrira également de nouvelles possibilités dans le cadre de la transition vers l'objectif « zéro énergie ». Les banques qui négligent les risques climatiques dans leurs pratiques de prêt, les assureurs qui continuent à négliger les risques climatiques dans leur souscription ou les fonds de pension qui laissent tomber les électeurs qui leur ont confié leurs économies, porteront sans aucun doute un fardeau financier important en raison du changement climatique. Ils s'exposeront également à un éventail plus large de risques liés au climat, tels que l'intervention réglementaire, l'activisme des actionnaires, la perte de clients ou les litiges liés au climat. Deloitte peut aider votre entreprise dans son parcours d'évaluation des risques climatiques, en utilisant des cadres climatiques et économiques préexistants avec notre expertise en modélisation réglementaire et financière⁷ et en vous aidant à évaluer la bonne méthodologie, les bons cadres et les bonnes décisions dans votre parcours de décarbonisation.

Notes de bas de page & Références

¹ C'est ce que l'on appelle traditionnellement la matérialité financière, tandis que la « double matérialité », qui évalue à la fois la matérialité financière et la matérialité d'impact (l'impact interne d'une entreprise sur le climat et la société), devient progressivement la manière la plus pertinente d'évaluer de manière holistique les risques et opportunités ESG au sens large d'une organisation.

² Banque centrale européenne, Les banques doivent se concentrer davantage sur le risque climatique, comme le montre le test de résistance de la BCE. Juillet 2022.

³ Network for Greening the Financial System, NGFS climate scenarios for central banks and supervisors. Septembre 2022.

⁴ Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change, Summary for Policymakers. 2022.

⁵ Conseil de stabilité financière, Climate Scenario Analysis by Jurisdictions : Initial findings and lessons. Novembre 2022.

⁶ La différence financière entre les projections avec et sans changement climatique est parfois appelée valeur à risque climatique.

⁷ Deloitte, Climate Stress Tests : Onwards and Upwards. Février 2023.

Les enjeux de modélisation pour évaluer l'impact macroéconomique de la transition climatique

Anne Epaulard, Maxime Gérardin, Boris Le Hir,
Aude Pommeret, Alice Robinet et Romain Schweizer



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Les documents de travail de France Stratégie présentent les travaux de recherche réalisés par ses experts, seuls ou en collaboration avec des experts extérieurs. L'objet de leur diffusion est de susciter le débat et d'appeler commentaires et critiques. Les documents de cette série sont publiés sous la responsabilité éditoriale du commissaire général. Les opinions et recommandations qui y figurent engagent leurs auteurs et n'ont pas vocation à refléter la position du Gouvernement.

Résumé

Au cours du premier semestre de l'année 2022, un groupe de travail, présidé par Jean Pisani-Ferry et organisé par France Stratégie, a réuni l'ensemble des administrations et institutions ainsi que des personnalités qualifiées¹ qui travaillent sur la modélisation macroéconomique des conséquences des politiques de lutte contre le réchauffement. L'initiative avait pour but de prendre connaissance des travaux de chacun et d'identifier ce qui, dans nos pratiques d'évaluation de la transition énergétique, était satisfaisant et ce qui devait/pouvait être amélioré. Une douzaine de réunions se sont tenues entre avril et juillet 2022, et une vingtaine d'auditions ont été réalisées².

Ces premiers travaux ont donné lieu à une note d'étape sur les mécanismes économiques de la transition, les caractéristiques des simulations effectuées avec les modèles existants et leurs limites, publiée en novembre 2022 par Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz³, comme prévu par la lettre de mission adressée en septembre par la Première ministre à Jean Pisani-Ferry, lui demandant de poursuivre son travail, afin de nourrir l'élaboration de la Stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC). Un rapport plus complet est prévu au printemps 2023.

Ce document, rédigé à l'issue du cycle de réunions, présente un point d'étape des travaux menés dans le groupe de travail jusqu'à juillet de façon plus détaillée que la note de novembre. Il a bénéficié de suggestions des membres du groupe de travail et de Jean Pisani-Ferry. Il présente (i) les principaux mécanismes économiques associés à la transition climatique, (ii) les caractéristiques et les limites des simulations effectuées avec les modèles macroéconomiques existants et (iii) les pistes d'amélioration des analyses macroéconomiques de la transition énergétique. Nous en résumons ici les principaux messages.

Les efforts à fournir pour lutter contre le réchauffement climatique auront des conséquences macroéconomiques importantes dès le court terme. La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), qui passera largement par la réduction de l'usage des énergies fossiles, nécessite dès maintenant un surcroît d'investissement souvent présenté dans les évaluations macroéconomiques de la transition comme un moteur de croissance économique (par combinaison d'effet de relance keynésienne et de réduction de la facture énergétique française). Ces évaluations souffrent toutefois d'un certain biais optimiste car elles sont fondées, dans les scénarios mis en avant, sur un bouquet d'hypothèses largement favorables (politiques optimales et coordination internationale, pas d'effets de frictions et de coûts de réallocation, modification spontanée des préférences, etc.). Les effets positifs du surcroît d'investissement sur l'activité économique à court terme ne sont pas garantis. Ils dépendent d'un grand nombre de facteurs, dont :

- le mode de financement de ces investissements (répartition entre financement public et privé, part du financement par endettement) ;

¹ Voir annexe 1.

² Voir annexe 2.

³ Pisani-Ferry J. et Mahfouz S. (2022), « L'action climatique : un enjeu macroéconomique », *La Note d'analyse*, n° 114, France Stratégie, novembre.

- le degré de coordination internationale ;
- l'ampleur et la nature des changements de préférences et de comportements des ménages ;
- les effets de frictions liées aux réallocations de capitaux et d'emplois (au sein des secteurs et entre secteurs) ;
- les politiques mises en œuvre pour déclencher et accompagner la transition ;
- la crédibilité de ces politiques publiques ;
- et l'ampleur et la nature de l'évolution technologique déclenchée par la transition.

Mesurer l'impact de la transition énergétique sur l'activité économique passe donc par l'incorporation de ces facteurs dans l'analyse quantitative et par l'appréciation des incertitudes correspondantes.

Une partie de l'insuffisance des analyses actuelles tient aux limites intrinsèques des modèles dont nous disposons aujourd'hui (capacité à représenter les changements de préférences ou les changements structurels à l'intérieur des secteurs, le progrès technique ou encore les instruments de politiques publiques de façon réaliste). Néanmoins, ces modèles intègrent d'ores et déjà une part importante des mécanismes macroéconomiques entrant en jeu dans la transition climatique. Afin d'éclairer l'élaboration des politiques publiques liées à la transition climatique sur de multiples dimensions, un certain nombre de principes sur le protocole d'utilisation des modèles et sur la publication de leurs résultats doivent être respectés. Les principaux étant :

- ne pas se limiter à une analyse en écart variantiel et détailler la description du scénario central dans son ensemble ainsi que les hypothèses sous-jacentes ;
- assurer la transparence sur le contenu et les mécanismes des modèles. Pour cela, les résultats bénéficieraient à être retranscrits de façon complète dans un cadre macroéconomique simple (équivalent *toy model*) pour bien en appréhender la logique et s'assurer de leur cohérence macroéconomique. En outre, les modèles étant souvent utilisés de façon très différente d'un exercice à l'autre, l'explicitation des éléments exogènes et des éléments endogènes est indispensable à chaque exercice ;
- détailler les résultats année après année sur un horizon temporel de court-moyen terme (dix ans ou 2030) pour identifier les potentielles sources de friction au démarrage de la transition ;
- tester la sensibilité des résultats à des hypothèses cruciales :
 - le contexte international, à la fois sur les hypothèses d'évolution des prix relatifs et des prix de l'énergie et matières premières ;
 - les modes de financement des mesures climatiques et les agents qui portent l'endettement (ménages, États, entreprises) ;
 - la politique budgétaire, comprenant le recyclage de la taxe carbone ou de recettes d'enchères dans le cadre de marché(s) de permis ;
 - les règles de politique monétaire mises en œuvre ;
 - les éléments d'évolution structurelle (progrès technique, comportement des agents).

Mots clés : transition écologique, modélisation, impact macroéconomique, évaluation, réchauffement climatique, modèles macroéconomiques

(...)

Encadré 1 – L'utilisation des modèles pour l'analyse de la transition climatique

La plupart des travaux d'évaluation *ex ante* de l'impact macroéconomique de la transition sont fondés sur des simulations de modèles dont l'objectif est d'intégrer la complexité des canaux de transmission et des interactions économiques. Ces modèles permettent d'évaluer l'impact des politiques/chocs de transition (la mise en place d'une taxe carbone, par exemple) sur les différentes variables qui sont supposées être directement affectées telles que la consommation d'énergie ou les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ uniquement dans beaucoup de cas) mais aussi sur des variables macroéconomiques standards telles que la croissance ou l'emploi.

Les principaux modèles utilisés pour l'analyse de la transition écologique peuvent être regroupés en trois grandes catégories mobilisées selon la question traitée.

Les modèles d'évaluation intégrée (ou modèles IAM) représentent dans un système numérique unique le cycle complet des interactions entre les activités humaines et la sphère environnementale. La conception de ces modèles mobilise de multiples champs disciplinaires (climatologie, géophysique, biologie, économie, ingénierie, etc.). Les principales relations décrites sont celles qui lient les activités économiques, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) dans les systèmes climatiques et les impacts du changement climatique sur les systèmes socioéconomiques (via des fonctions de dommage). Ces modèles permettent de définir le type mais aussi la proportion d'actions souhaitables pour atténuer le réchauffement climatique et s'inscrivent donc dans une logique coût-bénéfice. Le modèle DICE de Nordhaus¹¹ est un modèle emblématique des modèles IAM. Ces modèles apparaissent particulièrement pertinents pour définir un niveau d'effort pour limiter le réchauffement climatique au niveau mondial (approche coût-bénéfice), au prix toutefois d'hypothèses fragiles sur les impacts du dérèglement climatique.

Partant du principe que l'objectif à atteindre est désormais fixé et que l'on se place dans un périmètre géographique limité – la neutralité carbone à l'horizon 2050 en France, ou même au niveau européen – c'est plutôt dans une approche coût-efficacité que l'on se place et cela ne nécessite pas de modéliser la sphère environnementale (sauf éventuellement pour évaluer les coûts d'adaptation). Seules les composantes technologiques et macroéconomiques du système, ainsi que les flux d'émissions de GES, sont nécessaires à modéliser.

¹¹ Nordhaus W. (2017), « DICE/RICE models - William Nordhaus - Yale Economics ».

Les modèles technico-économiques, quant à eux, décrivent de façon détaillée les technologies de production d'un ou plusieurs secteurs. Ce sont des modèles dits « d'ingénieur ». La plupart d'entre eux se concentrent sur un domaine en particulier. Par exemple, les modèles TIMES (Mines Paris-Tech), POLES (Enerdata) ou PRIMES (NTUA, CE) visent à représenter de la façon la plus complète possible le système énergétique. Ce système inclut à la fois les technologies de production et les technologies liées à l'utilisation de l'énergie, et permet de gérer avec cohérence leurs substitutions potentielles. Ils peuvent ainsi fournir des informations à un niveau fin sur l'offre d'énergie, le mix énergétique et les technologies utilisées, les émissions émises, etc. L'objet principal de tels modèles est de définir la structure du système énergétique et d'en évaluer le coût pour y arriver en fonction d'un contexte macroéconomique donné, de la disponibilité des ressources, des politiques publiques et d'informations détaillées sur les technologies disponibles. D'autres modèles décrivent de façon spécifique le secteur agricole ou celui des transports sur une même logique. Ces modèles ne sont pas « bouclés » économiquement, et ne peuvent donc pas prendre en compte les effets de rétroactions macroéconomiques ou intersectorielles.

L'utilisation de modèles macroéconomiques est alors nécessaire pour assurer la cohérence macroéconomique de l'analyse de la transition climatique. Les modèles IMACLIM (Cired), ThreeME (OFCE-ADEME), NEMESIS (Seureco), Mirage (CEPII), Mésange (DGTrésor-Insee), GEM-E3 (CE-IPTS/NTUA) ou QUEST (CE-DGECFIN) font partie de cette catégorie de modèles. Au sein de cette catégorie, il est aussi usuel de distinguer les modèles selon les bases théoriques sur lesquels ils reposent (modèles plutôt « keynésiens » si l'équilibre de court terme est tel que les ajustements se font principalement par l'offre, ou plutôt « néoclassiques » si l'équilibre de court terme est obtenu principalement par des évolutions de prix) ainsi que sur leur traitement des anticipations (anticipations adaptatives, anticipations rationnelles, prévisions parfaites). Ces distinctions sont importantes pour les évolutions de court terme, moins pour les évolutions de moyen et long termes car sur le long terme les ajustements se font par les prix dans tous les modèles.

Dans ces modèles, qui fonctionnent sur la base de fonctions de production et de consommation, les rétroactions macroéconomiques des politiques environnementales passent en grande partie par des mécanismes de substitution entre facteurs de production et entre biens de consommation et, lorsque la politique est en partie financée par la dette, par un accroissement de la demande lié à l'investissement. L'ampleur des substitutions repose sur les paramètres des fonctions de production estimées ou calibrées sur données historiques. Les spécifications usuelles des fonctions de production s'avèrent cependant parfois trop frustes pour correctement décrire l'ensemble des possibles en matière technologique, compte tenu de l'ampleur des chocs attendus. Pour cela, des modules technologiques sont développés dans certains modèles (sur la production d'énergie ou le transport, par exemple). Le détail technologique reste toutefois limité pour des raisons techniques, la résolution numérique du modèle devenant impossible ou trop lourde au-delà d'un certain niveau de complexité.

Ces trois catégories de modèles se complètent et permettent de traiter des questions de nature différente. Certaines analyses nécessitent de tenir compte de la complexité de la réalité aux différents niveaux – à la fois au niveau technologique et au niveau macroéconomique par exemple. Dans ce cas, des exercices de couplage des modèles peuvent être envisagés (soit de façon simple avec une seule itération soit en bouclage total entre les modèles). Ces exercices sont toutefois délicats à mener et imposent certaines contraintes de compatibilité des modèles (les sorties de l'un étant utilisées comme entrée de l'autre et réciproquement dans le cas d'un bouclage, la structure de ces intrants/sortants doit être similaire). Si les travaux mettant en œuvre des couplages complets sont rares pour ces raisons, il existe un nombre important d'exercices dans lesquels les différents types de modèles sont utilisés en parallèle, l'un alimentant l'autre dans le calibrage des hypothèses.

Si d'un côté la complexité des mécanismes impose le recours à des approches très détaillées, de l'autre le principe de parcimonie doit s'appliquer à tout exercice de modélisation pour éviter autant que possible l'effet « boîte noire » et permettre la bonne compréhension et l'appropriation des résultats. Pour cela, des modèles plus simples (*toy models*), comme le modèle Vulcain développé par le CGDD (Commissariat général au développement durable), qui présentent des épures visant à mettre en évidence l'importance d'un élément donné dans la transition climatique (par exemple le rôle de la concurrence et de l'innovation), peuvent être utilisés. À ce titre certaines équipes de chercheurs en charge de gros modèles proposent des modèles réduits (*toy models*) en complément des modèles détaillés pour mieux mettre en évidence les rouages (voir KLEM, une version simplifiée du modèle Imaclim).

Il serait illusoire de vouloir établir la supériorité d'une approche par rapport à une autre. Les différentes modélisations sont complémentaires et doivent être menées de front pour dégager *in fine* un panorama complet et intelligible des enjeux de la transition climatique.

(...)

Encadré 4 – Les modèles sont-ils aptes à retracer les changements majeurs à attendre ?

Les paramètres des modèles macroéconomiques sont estimés ou calibrés pour retracer convenablement le passé. Le changement climatique va se traduire par des changements structurels de telle ampleur qu'il est possible que les paramètres estimés ou calibrés sur le passé ne soient plus valables. Dans le cas où les modèles sont composés d'équations estimées sous forme réduite (c'est-à-dire sans que l'on puisse remonter des paramètres estimés à des paramètres dits structurels représentant des technologies ou des préférences), ce questionnement est identique à la célèbre critique de Lucas (1976)³⁷. Mais la question de la stabilité des coefficients structurels estimés ou calibrés se pose aussi face aux changements structurels qu'implique la transition climatique. Par exemple, l'innovation technologique pourrait permettre d'augmenter significativement l'élasticité de substitution entre le capital et l'énergie (modification des fonctions de production), les préférences des ménages pourraient aussi évoluer rapidement, ce qui modifierait leur consommation d'énergie au-delà de ce que le seul signal prix ou les régulations pourraient déclencher.

Si les paramètres structurels changent rapidement, les impulsions (sous forme d'impôts, de subventions, de normes, etc.) pour déclencher la transition climatique pourraient être revues à la baisse et/ou le coût de la transition climatique pourrait être en partie réduit. La transition climatique nécessiterait cependant les mêmes changements de structure de l'économie (moins de consommation d'énergie fossile) ou une croissance économique plus faible (comme par exemple dans le scénario « Sobriété » établi par l'Ademe en 2021). Là encore, le tempo de la mise en place des politiques de transition est critique et interagit avec les modifications de comportements : l'impression d'une « imminence permanente » pouvant favoriser les comportements de type *wait and see*.

Du point de vue du modélisateur, l'incertitude sur l'évolution des paramètres structurels peut être en partie contournée en menant des études à des niveaux sectoriels fins où il est parfois possible d'envisager dès maintenant l'impact de la transition sur la fonction de production (par exemple le cas de l'automobile, présenté dans l'encadré 3). Mais l'incertitude sur ces paramètres ne sera levée que progressivement. Cela incite à réaliser des scénarios alternatifs dans lesquels un ou des paramètres structurels sont modifiés. Cela doit aussi conduire à une surveillance permanente des évolutions dans les habitudes de consommation des ménages et des entreprises. De ce point de vue, la mise à disposition – quasiment en temps réel pour les chercheurs en sciences sociales – des données de consommation d'électricité, de carburant, de transports collectifs, de viande, etc., permettrait d'identifier rapidement les effets des politiques sur la demande et les changements de préférences et de comportements.

(...)

³⁷ Lucas R. E. (1976), « [Econometric policy evaluation: A critique](#) », in Brunner K. et Meltzer A. H. (dir.), *The Phillips Curve and Labor Markets*, New York, American Elsevier, coll. « Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy », t. 1, p. 19-46.

Encadré 6 – Politique monétaire et transition climatique dans les modèles

Selon leurs objectifs ou les institutions pour lesquelles elles sont réalisées, les évaluations fondées sur les simulations de modèles appréhendent de façon différente ces interactions entre politique monétaire, risques financiers, changement climatique et transition.

La Banque de France et l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR), institutions largement concernées par ces questions, évaluent trois scénarios de risques de transition, à partir d'une suite de modélisations différentes : 1) un modèle économie-climat⁶⁴ définissant les niveaux d'émissions de GES et les niveaux de prix du carbone correspondant à chaque trajectoire, 2) le modèle macroéconomique multi-pays NiGEM, 3) un modèle sectoriel spécifique⁶⁵ qui désagrège ces variables en termes de valeur ajoutée et de chiffre d'affaires pour 55 secteurs économiques et 4) une partie proprement financière qui permet d'obtenir une note financière et probabilités de défaut associées pour chaque scénario⁶⁶. C'est ce dernier module qui permet de distinguer les secteurs gagnants des secteurs perdants (et potentiellement échoués dans les cas les plus adverses) de la transition.

D'autres modélisateurs développent des modules permettant de traiter spécifiquement ces questions. C'est en particulier le cas du Cired, qui développe un module spécifiquement financier au modèle Imacim⁶⁷ mais également de l'Ademe et de l'OFCE pour le modèle ThreeME. Jusqu'à présent, dans les modèles macroéconomiques type Imacim, ThreeME ou Nemesis, l'accent est davantage mis sur l'impact de la transition sur les taux nominaux, l'inflation et les éventuels effets d'éviction. Deux types d'hypothèses se distinguent. La première hypothèse est que le taux d'intérêt réel est supposé exogène et fixe par rapport à son niveau *ex ante*⁶⁸, quelle que soit l'évolution de l'inflation, ce qui implique que les investissements dans la transition énergétique ne conduisent pas à une raréfaction des fonds disponibles (réduisant ainsi les effets d'éviction susceptibles de pénaliser la croissance des autres secteurs mais soulevant la question de l'endettement des agents). L'autre hypothèse consiste à endogénéiser le taux d'intérêt. Des simulations réalisées avec le modèle Nemesis, par exemple, supposent un taux d'intérêt de chaque économie de la zone euro qui varie en fonction des besoins de financement de l'économie : une économie avec de forts besoins d'investissement pour assurer la transition énergétique verra son taux d'intérêt réel augmenter. Ces simulations montrent que cette hypothèse peut conduire à des trajectoires macroéconomiques radicalement différentes d'une hypothèse de taux d'intérêt fixé *ex ante* : à long terme, dans les simulations de Nemesis, la transition énergétique réduit le PIB et l'emploi lorsque le taux d'intérêt réel est endogène, alors que l'hypothèse de taux d'intérêt réel exogène aboutit à un surcroît de PIB à l'horizon 2050.

⁶⁴ Modèle type IAM (*integrated assessment model*).

⁶⁵ Modèle développé par Devulder A. et Lisack N. (2020), « [Carbon tax in a production network: Propagation and sectorial incidence](#) », Banque de France, Working Paper n° 760, avril.

⁶⁶ Allen T., Dees S., Boissinot J. *et al.* (2020), « [Climate-related scenarios for financial stability assessment...](#) », *op. cit.*

⁶⁷ Sur l'intégration d'un module financier stock-flux cohérent au modèle Imacim, des travaux très récents sont en cours. Voir notamment Daumas L. (2022), « [Transition risks, asset stranding and financial instability in a stock-flow consistent model of decarbonation trajectories](#) », Cired, janvier.

⁶⁸ Entre la *baseline* et le scénario de transition.

Conclusion

L'impact macroéconomique de la transition climatique est encore loin d'être appréhendé dans toutes ses dimensions et les modèles dont nous disposons aujourd'hui présentent certaines limites (capacité à représenter les changements de préférences ou les changements structurels à l'intérieur des secteurs, le progrès technique ou encore les instruments de politiques publiques de façon réaliste).

Néanmoins, ces modèles intègrent d'ores et déjà une partie des mécanismes macroéconomiques entrant en jeu dans la transition climatique.

Afin d'éclairer l'élaboration des politiques publiques liées à la transition climatique, un certain nombre de principes sur le protocole d'utilisation des modèles et sur la présentation des résultats doivent être respectés, les principaux étant (voir aussi annexe 3) :

- ne pas se limiter à une analyse en écart variantiel et détailler la description du scénario central dans son ensemble ainsi que les hypothèses sous-jacentes ;
- assurer la transparence sur le contenu et les mécanismes des modèles. Pour cela, les résultats gagneraient à être retranscrits de façon complète dans un cadre macroéconomique simple (équivalent *toy model*) pour bien en appréhender la logique et s'assurer de leur cohérence macroéconomique. En outre, les modèles étant souvent utilisés de façon très différente d'un exercice à l'autre, l'explication des éléments exogènes et des éléments endogènes est indispensable à chaque exercice ;
- détailler les résultats année après année sur un horizon de court-moyen terme (dix ans ou 2030) pour identifier les potentielles sources de friction au démarrage de la transition ;
- tester la sensibilité des résultats à des hypothèses cruciales :
 - le contexte international, à la fois sur les hypothèses d'évolution des prix relatifs et des prix de l'énergie et des matières premières ;
 - les modes de financement des mesures climatiques et les agents qui portent l'endettement (ménages, États, entreprises) ;
 - la politique budgétaire, comprenant le recyclage de la taxe carbone ou de recettes d'enchères dans le cadre de marché(s) de permis ;
 - les règles de politique monétaire mises en œuvre ;
 - les éléments d'évolution structurelle (progrès technique, comportement des agents).

Climate macroeconomic modelling handbook

October 2024



Foreword



Sabine Mauderer
Chair of the NGFS



James Talbot
Chair of the Workstream on Monetary Policy

As climate change and the transition to net zero begin to affect macroeconomic outcomes, not just over the medium-to-longer term, but also over the two-three year horizon, it becomes a relevant consideration for monetary policymakers. Central banks have identified a range of challenges in modelling these impacts, and while some aspects may require them to take on novel approaches, others can be addressed by making use of existing toolkits with suitable modifications.

Since it is clear that there is no modelling “silver bullet”, central banks should develop a toolkit that incorporates different models. This handbook provides practical guidance for central banks at various stages of their modelling journey.

The handbook draws on an in-depth survey of the work done by academics and policymakers to identify modelling approaches in the areas of greatest importance for central banks. It assesses the relative strengths and use cases of different approaches for determining physical and transition impacts. It also focuses on how different aspects of climate uncertainty can be incorporated in modelling.

This handbook is one of a suite of reports being published by the NGFS focused on assessing and understanding the macroeconomic effects of climate change and implications for monetary policy. Together, these reports provide an analytical foundation which allows central banks to better understand how climate change impacts on the achievement of their price stability mandate.

We are grateful to the NGFS members, observers and the NGFS Secretariat for contributing to this work. In particular, we would like to thank the co-leads of the subgroup on macro-modelling – Elías Albagli (Banco Central de Chile) and Stephen Murchison (Bank of Canada) – for leading the efforts in putting together this report. We hope the handbook will be useful to assist NGFS members whether they are beginning to consider climate impacts in their modelling for the first time or are seeking to enhance their capabilities further.

Executive summary

Climate science has shown that the rapid increase in the concentration of atmospheric CO₂ and other greenhouse gases (GHG) since the Industrial Revolution has resulted in climate change. The physical impacts of climate change will have significant economic consequences due to direct consequences on the productivity of sectors such as agriculture and livestock farming, mining, tourism, and of industries located in areas more exposed to physical impacts. At the same time, the world is already in a transition – albeit an increasingly delayed one – to reduce its dependence on fossil fuels and other carbon-emitting activities.

As explored in dedicated NGFS reports¹, physical and transition impacts will jointly have significant effects on the macroeconomy and macroeconomic variables relevant for monetary policymakers. The purpose of this document is to provide technical guidance to central banks and regulators in this area. This report is motivated by the desire expressed by the NGFS membership (see NGFS, 2023a).

This document is based on an in-depth survey of the work done by academics and policymakers on these issues, with a focus on structural macroeconomic modelling. The document is tailored to help NGFS members at different levels of development and engagement – whether they are beginning to consider climate change modelling, or whether they have already begun efforts and are in the process of choosing next steps.

The core of the document is laid out in two sections.

The first section deals with the advances made in modelling and quantifying physical impacts of climate change (i.e. changes in the distribution that governs weather patterns and events along several, interrelated dimensions). Most climate change effects can be categorised into chronic and acute impacts. Chronic impacts originate from changes in the means of the different dimensions of the climate distribution. Arguably, they can be thought of as affecting the economy in more predictable ways (i.e. through average temperature or sea level rise). Acute impacts originate from the realisation of the tails of

the climate distribution (i.e. extreme weather events, such as droughts, floods, wildfires and hurricanes).

The bulk of the literature reviewed in this section uses Integrated Assessment Models (IAMs), which combine economic and climate modules to understand the effects of climate change in the economy. This handbook namely expands upon the fact that it is better to have different models for different questions, as the level of complexity that can be managed by any single model is limited.

In particular, to understand and model chronic impacts, this handbook suggests that its users favour IAMs based on a computable general equilibrium structure (CGE), which assumes perfect foresight. This is useful because the simplification gained by dropping uncertainty allows the inclusion of other features, such as non-linearities, or more layers of sectoral and geographical disaggregation. Naturally, the user should be wary that supposedly chronic impacts can also accelerate, and cause either non-linear damages or exacerbate harm along other climate dimensions. Uncertainty would also be absent in these models.

On the other hand, if the user wants to understand the effects of higher frequency, acute climate events, IAMs based on a Dynamic Stochastic General Equilibrium (DSGE) structure which are better equipped to deal with stochastic events. Furthermore, DSGE models are used to evaluate policy scenarios, particularly with regard to conjunctural policies such as monetary and fiscal policy. The drawback of this approach includes model structures that often feature a high level of aggregation and therefore do not allow to consider sectoral developments properly which is the benefit of multi-sector CGEs.

In short, different questions benefit from different methodological approaches, whose merits and limitations should be understood so as to make them work as effective complements.

The climate and the economic modules of IAMs are often linked by damage functions, which assess the channels

¹ See Acute physical impacts from climate change and monetary policy (NGFS, 2024a) and The green transition and the macroeconomy: a monetary policy perspective <https://www.ngfs.net/en/green-transition-and-macroeconomy-monetary-policy-perspective> (NGFS, 2024b).

through which climate change affects the economy². The damage functions reviewed usually use mean temperature rise as the main climate stressor. While this is a prototypical choice, this handbook stresses the importance, and gives examples, of work that includes stressors arising from other climate dimensions (e.g. sea level rise). This emphasis responds to need to better accommodate the most pressing climate change manifestations of different countries.

This first section on physical impact ends with an analysis of the uncertainty inherent in climate change modelling. It distinguishes between the uncertainties faced by the modeller, from those faced by economic agents. The first type of uncertainty includes the specific structure of a model, the value of parameters used in it, and so on. The second type of uncertainty, which is faced by economic agents within a particular model, refers to how physical impacts may affect agents' behaviour – for instance, risk aversion affecting investment and precautionary saving, giving rise to additional transmission channels. Generally, the stochastic and dynamic environment of IAMs with DSGE models lends itself better to understand this second type of uncertainty.

The second section of the handbook surveys advances in the work on transition impact modelling. The work reviewed here studies the macroeconomic dynamics that arise during the phasing out of fossil fuels and the adoption of more energy efficient and less polluting technologies, often motivated by changes in policies (i.e. carbon pricing, regulation).

This section discusses different technical approaches and presents several suggestions. There is an emphasis on the supply side of the model including firms that cannot easily substitute among production inputs, at least in the short term. It delves into the importance of including more realistic production structures in which consumption and investment goods are made using intermediate green³ and carbon-intensive inputs. Importantly, the handbook presents examples on how to model technological change, which can play a relevant role in speeding up the transition.

This section also discusses the role of uncertainty. As before, there is uncertainty with the economic structure and parameters, but this section also highlights how uncertainty in transition policies themselves can affect incentives driving firms and households' decisions – for instance, through irreversible investments whose returns may be affected by changes in policies brought about by the political cycle.

Besides these two main sections, this handbook includes boxes that complement the main discussion.

Box 1 summarises how to better use the document. Box 2 discussed important considerations that, due to their complexity, are mostly absent from current models, but are promising avenues for future research. They include damage functions with multiple stressors, and where damages from acute impacts can accumulate; climate systems with non-linearities and tipping points; and complex socio-economic interactions of climate change such as mass population movement and social conflict. Finally, Box 3 stresses the importance of considering multiple models in order to understand different aspects of climate change and provides illustrations of such cases.

The report has three key takeaways for modellers at central banks and financial regulators:

1. Modelling climate change is paramount to understanding both the coming physical damages and the economic disruptions inherent in transition policies tailored to mitigate them. All of the articles reviewed in this handbook dealt with issues related to these topics, and included macroeconomic relevant mechanisms and quantities. Although the levers for the climate transition are outside of central bank mandates, if the impact of climate change is relevant at the macroeconomic level, central banks will need to understand and incorporate their effects with their macroeconomic modelling.
2. Modelling climate change is difficult. Models have improved, but there is no silver bullet. Central banks should confront these challenges not as a single project, but rather as a research agenda which gradually incorporates and adapts different models into a broader analytical toolkit. Such toolkits can then be used to provide more robust answers to the different, interrelated questions that the coming change in climate will pose to economic decision makers.

² Although IAMs often feature a damage function it is by no means an essential model component. See, for example, the discussion about cost-effectiveness vs. cost-benefit IAMs (section 3.1) in Drudi *et al.* 2021.

³ "Green" in the context of this report refers to activities which are more closely aligned with the transition to a net zero economy. This may include low-carbon assets, as well as assets that help with the "greening" of traditionally carbon-intensive activities (as part of the provision of transition finance).

3. Modelling climate change requires addressing several dimensions of uncertainty that differ between physical and transition impacts.

For physical impacts, the key uncertainty is about how a process interacts with the economies. Here the challenge is improving the modelling of climate change and its impacts, which are highly multidimensional, non-linear, and subject to tipping points.

(...)

For transition impacts, there is uncertainty on how new technologies may accelerate changes in industries and the speed of convergence towards net zero. But perhaps more importantly, both firms and households face the crucial uncertainty about whether climate change policies may be reversed due to the political cycle, which can have important implications for resource allocation in economies.

Making macroeconomic and financial models work for climate risk regulation and resilient banking

Insights from the NGFS short term scenarios

Prof. Irene Monasterolo
Utrecht University, CEPR, WU Wien.



The views expressed here are those of the author and do not necessarily reflect those of the Network for Greening the Financial System (NGFS).

Monasterolo_FinSAC International Conference _2025

Network for Greening the Financial System
Workstream on Scenario Design and Analysis

NGFS Short-Term Scenarios for central banks and supervisors

May 2025



Key novelties

- **5-year horizon:** economic and financial impacts of climate risks assessed within a regulatory, policy and investment relevant (e.g. stress test) timeframe
- **Integration of economy-finance feedback loop:** how changes in sectoral probability of default (PD), financial valuation, risk, monetary policy affect macro-financial stability.
- **Financial risk variables ready to use and plug into internal models!**
- **Granular, bottom-up climate risk assessment** (46 countries, 50 sectors).
- **Compound risk** (floods, storms, heatwaves, droughts, wildfires), **coupling of physical and transition risk**
- **Cross-regional transmission of shocks:** spillover effects of **both transition and physical risk** through trade linkages, financial markets, disrupted supply chains.



Short-term scenario narratives

TRANSITION RISK

Highway to Paris (HWTP): A technology-driven (and orderly) transition unfolds gradually. Carbon tax revenues are reinvested into green* subsidies and investments. While short-term energy prices rise, economic growth from higher investments offsets these impacts. Consumers and investors increasingly favour green sectors, while high-polluting sectors face rising credit risks and capital costs.

TRANSITION RISK + PHYSICAL RISK

Diverging Realities (DiRe): Advanced economies (North America, Europe, Oceania and part of Asia) pursue a net-zero transition in line with Highway to Paris. The rest of the world is hit by a sequence of extreme weather events, with effects that propagate globally via trade and financial linkages. Supply chain disruptions in critical raw materials create spillover effects for advanced economies and increase the cost of their transition to a low-carbon economy.

TRANSITION RISK

Sudden Wake-Up Call (SWUC): A world of widespread climate unawareness is challenged by a sudden change in policy preferences. Consumer and investor preferences shift abruptly toward green* sectors. A sharp surge in carbon prices triggers a supply shock. The transition occurs too suddenly for markets to adapt, leading to a "Climate Minsky Moment" - a wave of financial instability as asset values adjust abruptly.

PHYSICAL RISK

Disasters and Policy Stagnation (DaPS): A sequence of region-specific extreme weather events occurring in 2026 and 2027 result in capital destruction, reduced productivity and production, and creates cascading economic impacts. Trade and financial linkages spread the negative impacts across the world, amplifying financial and economic instability.

The "Disasters and Policy Stagnation" scenario is called "Low Policy Ambition and Disasters" in the conceptual note. This scenario has 6 versions, one simulation of extreme weather events per region, with the rest of the world is only affected via trade and financial linkages. The conceptual note also included a fifth scenario, Green Bubble, which is not part of this scenario vintage.

Physical risk is modelled, in the short-term scenarios, as extreme weather events (or "acute" physical risk). Chronic physical risk is not considered in these scenarios.

* For definition of "green" and other classifications, please refer to the annex slide "Variable and regional aggregations".

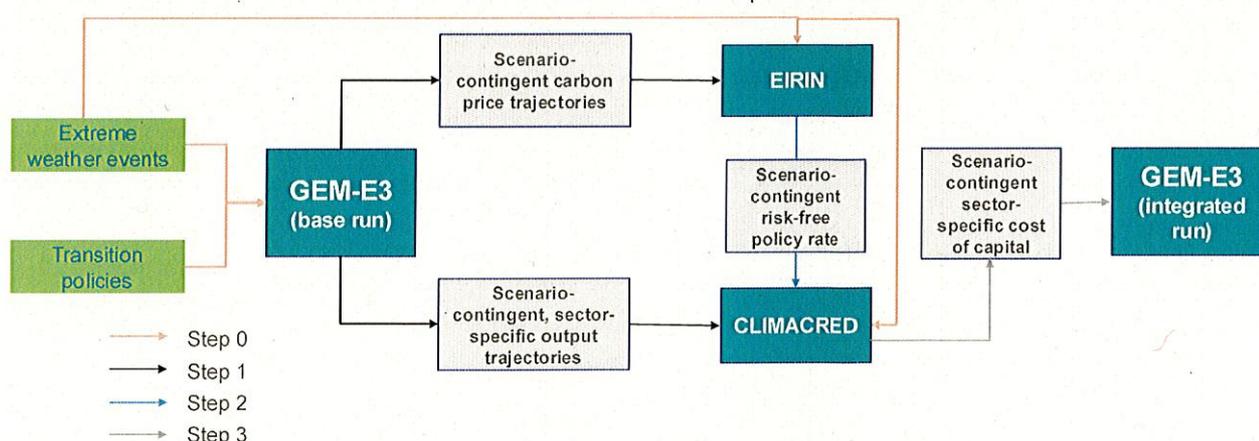


Physical and compound risk assessment

- **Lack of statistical models of the joint distribution of hazards** that could be used to simulate directly compound events in catastrophe risk models, even in the context of scenario-contingent projections
- **Physical climate storylines (CS)** describe compound events (**heatwave-drought-wildfire, storm-flood types**) at the continental scale (footprints of the largest events for systemic risk considerations):
 - provide *spatially and temporally coherent scenarios at the regional scale that are conditioned on those uncertain aspects of the climate response*
 - Continental region (Africa, Asia, North America, South America, Europe and Oceania)
 - **RP** (magnitude of hazards): 50 in DaPS, 20 in DiRe
 - **heatwave-drought-wildfire (HDW) storyline:** continent scale mega-event consists of, in the joint realization in each country, an x year RP drought (area affected), an x year RP wildfire season (burnt area), and an x year RP heatwaves (people affected).
 - **storm-flood (SF) storyline:** a continent scale mega-event consists of the joint realization in each country of an x year RP event in terms of annual storm damage, annual river flood damage and annual coastal flood damage (in terms of economic capital affected).



A novel modelling framework

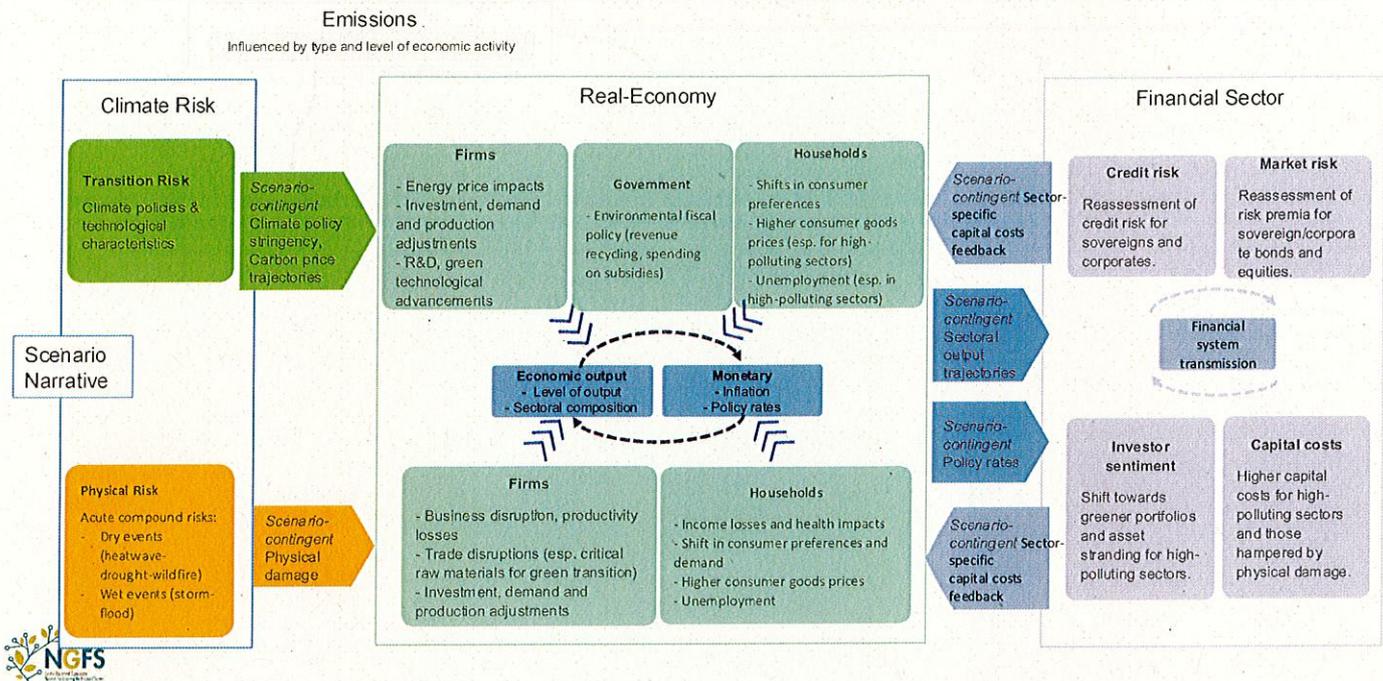


- ✓ **GEM-E3:** Computable General Equilibrium Model for Economy-Energy-Environment: real macro variables and climate related variables at a high level of granularity.
- ✓ **EIRIN:** Stock-Flow Consistent behavioural model used to project inflation and monetary policy.
- ✓ **CLIMACRED:** climate credit risk model that allows for scenario-contingent valuation of bonds, equity.



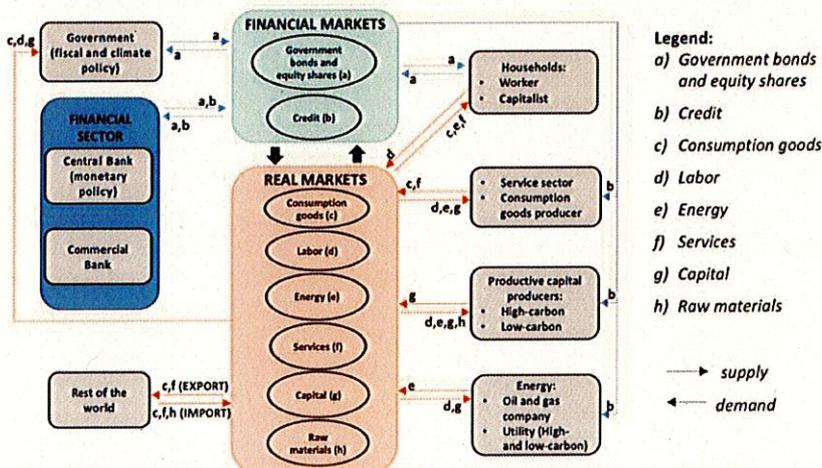
*For the implementation of physical risk, the direct physical effects on GEM-E3 sectors are applied to all three models, and combined in the GEM-E3 integrated run

Transmission channels, economic and financial feedbacks



Macro-financial model: EIRIN

- Agents and sectors' balance sheet items calibrated at country or regional level.
- Model calibrated on IMF data (past 10 years + forecast for baseline alignment)



- **Financial sector dynamics** and finance-macro feedbacks via risk assessment.
- **Endogenous money creation:** banks create money through lending.
- **Adaptive expectations:** agents cannot fully anticipate shocks. This affects the magnitude of the shock in the economy and its persistency.

Figure: Agents, sectors and markets of the EIRIN economy. Grey boxes: agents and sectors. Light blue box: financial markets. Orange box: real markets. Outgoing arrows: supply. Incoming arrows: demand. Source: Monasterolo & Raberto 2018, Dunz ea 2023, Gourdel ea 2024).

Climate credit risk model: CLIMACRED

- Scenario-contingent evolution of firm's cash flows.
- Calibrated on a baseline scenario. **Market's expectations** and the valuation of financial assets is assumed to be initially consistent with this baseline.
- **A change in market expectations on the scenario shock leads to an adjustment of the financial assets**
- **Transition risk:** asset-side of the balance sheet impacted by asset stranding while reduction of output reduces the cashflow and thus the financing capacity.
- **Physical risk:** destruction of productive capital diminishes the assets of the firm and/or increases its debt because of reconstruction costs, while business interruptions reduce the cashflow.

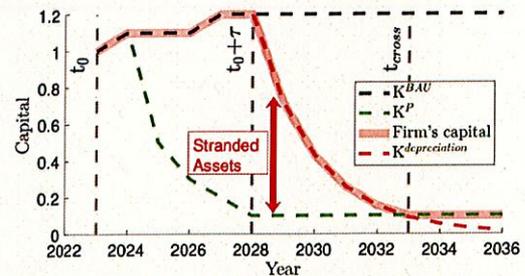
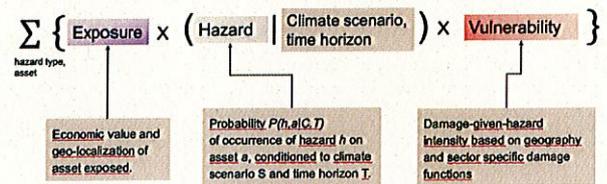


Figure 1: Illustration of the effect of stranding on the trajectory of capital in a simple case.

Source: Battiston et al (2023), CEPR wp.



Source: Mandel et al (2025), Nature Climate Change.

Model advantages: better 'quantification of the storm'

- **Risk-specific entry points** in the economy and **transmission channels** (whether supply or demand side, and their interplay)
 - **Adaptive expectations and out of equilibrium** to capture climate risk uncertainty
 - **Role of monetary policy response** in shock recovery, interplay with fiscal-financial policies
 - How **financial risk assessment** affects investment decision in the transition and in disaster recovery
- ➔
- **More adequate and realistic assessment of climate macro-financial risks** (size and persistency of shocks)
 - Quantification of the financing needs and **climate insurance protection gap**
 - **Identification of opportunities for policy intervention and coordination** (fiscal - monetary - prudential).
 - **Socio-economic trade-offs** that could emerge in the transition (and if we do not make the transition).

Results: larger economic shocks, persistence, financial amplification

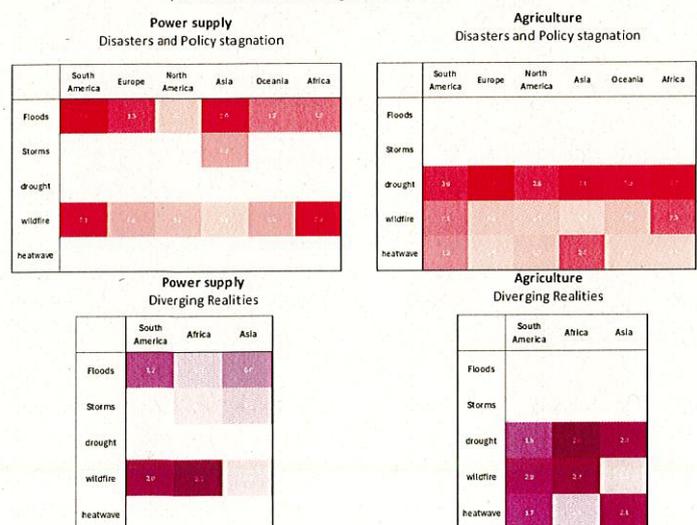
- **Rapid and unexpected policy shifts increase the economic costs and cause financial stress:**
 - PD increase in many sectors: power supply +10pp (high capital intensity, debt to capital ratio)
- **Effective climate policies and global coordination limit the negative effects of transition:**
 - Gradual carbon prices increase, effective recycling of carbon tax revenues into green investments, limit global output losses to 0.5% in 2030, while effectively reducing emissions.
- **Compound events in a region causes large GDP losses affecting the global economy:**
 - Impacts of extreme disasters vary across regions (12,5% of GDP in Africa).
 - Regional disasters affect the global economy through trade and financial linkages: PD rise for high-capital and high-debt sectors, with increases of more than 10pp in power supply.
- **Supply chain bottlenecks caused by climate disasters in some regions can generate strong and persisting output losses and macroeconomic spillovers:**
 - Global GDP losses peak at over 3%. Green transition efforts become more financially costly.



Key assumptions: Physical Risk

- **Extreme weather events** impact the economy via several channels depending on the type of hazard. These are **capital destruction, productivity and production loss, and labour productivity loss**.
- In **Disasters and Policy Stagnation**, two types of compound events are modelled, one region at a time: (1) the combination of **droughts, heatwaves, and wildfires** (dry events) in 2026, and (2) the combination of **floods and storms** (wet events) in 2027. These are **plausible but extremely severe events** (return period of 1 in every 50 years). The scenario has **six regional versions**, where each assumes that the events occur in the given region, affecting the global economy through financial and trade linkages.
- In **Diverging Realities**, the combination of **heatwaves, droughts, and wildfires** are assumed to occur in Asia in 2025, in South America in 2026, and in Africa in 2027. **Floods and storms** occur in Asia in 2028, in South America in 2029, and in Africa in 2030. These events are less severe than in *Disasters and Policy Stagnation* (return period of 1 in every 20 years).

Weather impacts, average effects across countries of the region
(darker colour indicates larger loss of productive factors)



All figures refer to world economy.
 * A story-line approach consists of a narrative-driven scenario, describing a sequence of events over time, instead of focusing primarily on quantitative projections or probabilities (as it is instead done in the long-term scenarios for physical risk). One shortcoming is the focus on a specific set or sequence of events, while other combinations might be or turn more relevant.
 **The impacts, as share loss, are reported on the same scale for convenience but are not directly comparable as they represent the lost share of different economic variables (physical assets, productivity). The impacts are averages over the years of impact, sectors and countries.

L'impact du risque climatique sur la modélisation de la PD

I. Contexte réglementaire

AUTEUR
Ulrich Nguemdjo

SUPERVISEURS Olivier
Gassner

RELECTEURS
Eric Bataille Alicia
Gardette

Les perturbations liées aux changements climatiques sont de plus en plus visibles sur nos économies et nos entreprises. Le changement climatique est un processus qui se déroule sur une longue période, avec une forte incertitude quant aux événements climatiques extrêmes qui se produiront à l'avenir. Les chocs climatiques étant très différents des chocs financiers observés lors des crises passées, les risques associés sont très peu compris au sein des institutions financières [1]. Dans ce contexte, la BCE a multiplié les travaux sur la persistance des risques environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG), et a établi une feuille de route sur la question climatique [2]:

- Énoncé d'un rapport pour évaluer l'opportunité d'intégrer les risques ESG dans leur dispositif de supervision avec publication de guidelines à un horizon 2022-2024 ;
- Consultation des banques sur les modalités de reporting (Implementation Technical Standard) des risques ESG, obligation inscrite dans la CRR2 pour une entrée en vigueur en juin 2022 ;
- Décision sur l'opportunité d'un traitement dédié des risques sociaux et environnementaux (Article 501c de la CRR 2) – rapport final de l'EBA attendu en juin 2025.

Conformément au guide relatif aux risques liés au climat et à l'environnement émis par la BCE en novembre 2020 fixant les attentes prudentielles en matière de gestion et déclaration des risques, des études ont été menées en parallèle par le Network for Greening the Financial System (NGFS) afin de présenter des scénarios sur lesquels ont été construits les tests de résistance réalisés par la BCE et publiés le 22 septembre 2021. Les résultats de ces travaux montrent que, en l'absence de nouvelles politiques climatiques, les coûts associés aux événements extrêmes augmenteraient de manière substantielle pour les entreprises. Le changement climatique constitue donc une source majeure de risque systémique, en particulier pour les banques détenant des portefeuilles concentrés sur certains secteurs économiques ou zones géographiques [1]. Ce dernier rapport constitue ainsi le lancement de la première des trois grandes étapes d'une feuille de route climat de la BCE qui servira de base aux travaux, en 2022, d'un nouvel exercice de test de résistance des banques, supervisé par l'institution.

- Première étape : ouvrir le chantier de collecte des données fiables et intégrer les risques climatiques¹ dans les modèles d'évaluation des risques ;
- Deuxième étape : évaluer la qualité des actifs par rapport à leurs expositions au risque climatique et les communiquer de manière transparente ;
- Troisième étape : Mise en place d'une taxonomie des investissements verts, pour une entrée en vigueur en 2022.

(1) On parlera indifféremment du ou des risques climatiques, lorsque l'on souhaite ou non insister sur leur pluralité.

Au niveau national, la Banque de France et l'ACPR ont lancé un programme de travail sur la prise en compte et la gestion des risques liés au changement climatique dans le système financier. L'objectif de ces travaux est de faire un bilan sur la mise en œuvre des dispositions de **la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte**. Ainsi selon leurs études, en 2020 environ 12% de l'encours total des banques françaises étaient exposé à des secteurs vulnérables au risque de transition, et environ 2,5% des actifs des établissements financiers français sont situés dans des zones géographiques moyennement ou fortement vulnérables aux changements climatiques [3].

De son côté, le monde universitaire se mobilise aussi autour de ces questions. Plusieurs travaux à destination des banques, des superviseurs, et autres professionnels de la finance ont fait l'objet de publication. Ces travaux ont pour objectifs d'attirer l'attention sur l'urgence de la situation en présentant l'état d'avancement des travaux et des guidelines relatifs aux changements climatiques et au risque financier [4, 5] [4, 5], les scénarios d'impact du climat sur le système financier [5, 6] [5, 6], et quelques approches pour l'inclusion du risque climatique dans les standards de modélisation du risque bancaire [6].

Le présent article a pour objectif de donner un aperçu de l'intégration quantitative des risques liés aux changements climatiques et environnementaux dans les modèles de risque des banques, notamment à travers l'exemple d'un modèle de probabilité de défaut. Cette intégration s'appuie sur les hypothèses de modélisation utilisées dans l'approche IRB, notamment l'identification des facteurs climatiques par des variables et leur impact sur la solvabilité d'une contrepartie, la configuration linéaire des effets de ces facteurs et la stabilité du lien entre les facteurs et la solvabilité.

L'article s'articulera en trois grandes parties : (I) une présentation des risques climatiques et de leur impact potentiel sur le secteur bancaire (impact sur l'ensemble des risques bancaires du pilier 1 bâlois), (II) un focus sur l'inclusion du risque climatique dans la modélisation d'un paramètre de risque (III) un cas pratique pour un modèle de probabilité de défaut.

II. Approche méthodologique

1. Risques climatiques et impact sur le secteur bancaire

Les risques liés au climat et à l'environnement, ou risques climatiques, renvoient aux risques qu'encourent les institutions bancaires suite aux changements climatiques et à la dégradation de l'environnement. Leur impact se décline en deux composantes : le risque physique et le risque de transition [2, 7, 8]:

- Les risques physiques font référence aux pertes liées aux changements climatiques et à la dégradation de l'environnement. On parlera de risques physiques « aigus » lorsqu'ils découlent d'événements extrêmes (sécheresse, inondations, tempêtes), et de risques physiques « chroniques » lorsque les risques physiques résultent de changements progressifs tels que la hausse des températures, l'élévation du niveau de la mer, le stress hydrique, la perte de biodiversité, la dégradation du sol, la destruction de l'habitat ou encore la pénurie des ressources.

- Les risques de transition font référence aux pertes directes ou indirectes liées au processus de transition vers une économie sobre en carbone et plus soutenable d'un point de vue environnemental. Ils peuvent être la conséquence, par exemple, d'un changement dans la politique climatique et environnementale, du progrès technologique, ou d'une variation du sentiment et des préférences de marché.

Ces deux composantes des risques climatiques ne sont pas indépendantes. En effet, une rapide transition vers une économie verte accompagnée d'une hausse volontaire du risque de transition pourrait permettre, dans l'optique des régulateurs et des législateurs, de réduire les risques physiques sur le long terme.

L'impact des risques physiques et de transition sur le système financier peut se manifester, soit directement par les pertes de rentabilité des entreprises ou la dévaluation de leurs actifs, soit indirectement par le biais des changements macro financiers (choc sur le marché financier avec une hausse des prix des matières premières, suite aux politiques visant à réduire le carbone par exemple) [2]. Dans le secteur bancaire, les risques climatiques peuvent constituer un facteur déterminant dans l'estimation des paramètres de risque financier existants dans le cadre du pilier 1 de la réglementation bâloise [2, 8].

Pour le **risque de crédit**, le risque physique lié aux changements climatiques peut influencer la PD et la LGD. En effet, une hausse du risque d'inondation, par exemple, peut augmenter les pertes dans les portefeuilles immobiliers par le biais d'une diminution des valorisations des sûretés, ce qui aura un impact sur la LGD. D'autre part, les normes d'efficacité énergétique, qui constituent un exemple de risque de transition, sont susceptibles d'entraîner d'importants coûts d'adaptation et d'entamer la rentabilité des entreprises engagées dans le secteur immobilier, ce qui peut faire augmenter la PD et baisser la valeur des garanties.

En ce qui concerne le **risque de marché**, les risques physiques extrêmes, tout comme les facteurs de risque de transition, peuvent provoquer des revirements des anticipations des marchés qui se traduiraient par de soudaines dévalorisations, un regain de volatilité et des moins-values sur actifs sur certaines places, ou encore une brusque dévalorisation des titres et des produits dérivés.

Pour le **risque opérationnel**, les activités des banques peuvent être perturbées par des dommages physiques causés à ses biens immobiliers, ses filiales et ses centres de données par la suite d'un événement climatique extrême. Un revirement du sentiment des consommateurs relatif aux questions climatiques peut également entraîner des risques d'atteinte à la réputation et de responsabilité en raison des scandales suscités par le financement d'activités controversées d'un point de vue environnemental.

2. Sources de données et indicateurs pertinents sur les risques climatiques dans un modèle de défaut

D'après le rapport du Comité de Bâle (BCBS), leur inclusion dans les standards de management de risque des banques peut suivre le même processus que celui utilisé pour gérer les autres facteurs significatifs de risques [9]. Cette partie décrit la prise en compte des risques climatiques dans un cas pratique de modélisation du risque. Elle présente dans un premier temps, les données et les indicateurs pertinents pour mesurer les risques climatiques et ensuite la méthodologie d'inclusion de ce risque dans un modèle de probabilité de défaut.

L'un des aspects importants dans l'intégration des risques climatiques dans les standards de management de risque est le choix des sources de données climatiques.

Si les sources de données dans ce domaine deviennent de plus en plus disponibles, elles restent toutefois insuffisantes en ce qui concerne les types de risques climatiques couverts et la qualité de la donnée. Cette insuffisance dans la qualité des données doit attirer l'attention sur l'importance du choix d'une ou plusieurs sources de données fiables et pérennes. A cet effet, dans le rapport des activités du groupe de travail organisé par le TFCR (Basel Commette's Task Force on Climate-related Financial Risks) d'octobre à novembre 2020, les participants ont identifié un certain nombre de sources de données permettant de capter de façon fiable les risques liés aux changements climatiques et environnementaux [9]. Ces sources incluent des données existantes au sein des institutions bancaires (la localisation géographique, le secteur d'activité...), des données issues des enquêtes² adressées aux clients de la banque et initiées par celle-ci, mais également des données de sources externes³ provenant du secteur public, des agences de notation, de secteur privé ou des ONG.

Pour ce qui est des indicateurs des risques climatiques, plusieurs ont été définis par le Comité de Bâle (BCBS) dans son rapport d'avril 2021. Ces indicateurs sont généralement une combinaison des variables climatiques telles que la pluviométrie, les températures, l'humidité, les vents, provenant des modèles climatiques [9, 10]. Ils doivent permettre d'évaluer l'impact financier d'un hasard climatique sur le niveau de risque des clients d'un portefeuille. Certains de ces indicateurs (le secteur d'activité, la localisation géographique) sont déjà intégrés dans les pratiques des banques sur les modèles probabilité de défaut, le stress test, ou encore les analyses de sensibilité des modèles.

Risque physique

Un des indicateurs pertinents pour mesurer l'impact du risque physique est la localisation géographique. L'intégration des données géospatiales (données topographiques, données satellitaires) dans les modèles de risque permet de prendre en compte l'hétérogénéité géographique. En effet, les manifestations climatiques étant fonction de la diversité géographique, les pertes financières liées aux risques aigus ou chroniques ne seront pas les mêmes. A cet indicateur, peut s'ajouter la probabilité de survenance d'une inondation dans la région, ou d'une manière générale, le score de survenance d'un évènement extrême [9]. Ce score de risque d'évènement extrême, calculé sur la base de critères quantitatifs et qualitatifs, permet de noter l'exposition des actifs, des entreprises et des portefeuilles aux risques physiques. Toutefois, il est à noter que le score de risque physique peut présenter des biais, comparé aux autres scores de risques du fait d'une profondeur historique courte et d'une faible disponibilité des données sur de petites unités statistiques.

(2) Par exemple, des enquêtes de collecte des informations relative à la stratégie du client face aux risque climatique, les coûts liés aux risques transitions, ou encore les pertes dues à un choc climatique sur son activité...

(3) Ces données externes incluent aussi les données provenant des rapports annuels des compagnies

Risque de transition

Comme mentionné par le BCBS, le principal indicateur permettant de capter le risque de transition est l’empreinte carbone ou l’intensité d’émission du carbone de la contrepartie, ou comme proxy, son alignement vis-à-vis des objectifs climatiques [9]. Cet indicateur peut être complété par une évaluation de la stratégie interne de transition vers une économie sobre en carbone, l’efficacité énergétique ou encore le label énergétique de la contrepartie. Cependant, le principal problème avec ces indicateurs reste leur disponibilité et leur qualité. En l’absence des indicateurs mentionnés précédemment, un élément important à considérer est le secteur d’activité économique de la contrepartie. Le secteur d’activité économique donne une première information sur la nature de l’activité en termes d’impact ou d’exposition aux risques climatiques (l’intensité des émissions des gaz à effet de serre, l’intégration des nouvelles technologies, le changement dans l’écosystème).

De façon générale, l’absence de données fiables (l’historicité, la complétude, et la représentativité des données climatiques) sur les risques climatiques représente un véritable défi et doit être pris en compte par les banques lors de l’intégration des risques climatiques dans les standards d’estimation des paramètres du pilier 1.

Source de données	Zone couverte
Nasa	Monde
NOAA	Amérique du Nord
Copernicus	Europe
OCDE	Europe
Météo France	France
UNEP	Monde
FAO GeoNetwork	Monde
NGFS	Monde
Eurostat	Europe
Insee	France
BEI	Europe
Banque Mondiale	Monde
CNRS	France

Tableau 1 : Liste non-exhaustive des sources de données sur les risques climatiques

3. Méthodologie d'intégration du risque climatique dans un modèle de défaut

A ce jour, quelques approches d'inclusion des risques climatiques dans l'estimation des paramètres des modèles de probabilité de défaut ont été proposées et mises en application [2, 9].

Une approche d'inclusion utilisée est la construction d'un score des contreparties suivant le secteur d'activité et le risque climatique qui lui est associé. La banque commence par identifier les secteurs d'activité économique sensibles aux différents risques climatiques et établit des critères de risques techniques spécifiques au secteur. Comme pour l'évaluation du risque de défaut bancaire, la banque évalue pour chaque contrepartie du portefeuille, son niveau de conformité aux politiques environnementales sur la base des différents critères liés aux risques climatiques. Le niveau de conformité aux politiques environnementales permettra ainsi la construction d'un score de conformité [9]. La banque définit ensuite un seuil minimum de conformité au niveau du portefeuille. Les mesures d'acceptation des risques climatiques de la contrepartie seront ainsi examinées régulièrement suivant ce seuil de conformité et pris en compte dans l'ajustement des paramètres de risque de crédit, notamment sa probabilité de défaut.

Il est également possible d'intégrer les risques climatiques en tant que drivers dans les modèles de risques. En effet, dans l'approche IRB, les méthodes d'estimations des paramètres de risque généralement utilisées ne sont pas assez sensibles pour capturer la complexité liée aux risques climatiques [11]. Il est donc nécessaire de faire apparaître les risques climatiques dans les méthodes et les variables. Les risques financiers liés aux changements climatiques, par exemple, pourront donc être explorés dans le modèle à travers des interactions et des interdépendances entre indicateurs de risques climatiques et drivers de risque [11].

(...)

des risques liés aux changements climatiques et environnementaux dans un modèle de probabilité de défaut. La première partie du document, consacrée à une revue des travaux sur le risque climatique, a permis d'identifier les deux composantes du risque climatique (le risque physique et le risque de transition) et d'établir leur impact sur les facteurs déterminants des risques financiers susceptibles d'influencer les paramètres de risque (PD et LGD) important dans le calcul des fonds propres de l'institution. Par ailleurs, cette partie a souligné l'existence de sources de données permettant de mesurer le risque climatique et l'importance de la fiabilité et la pérennité dans le temps dans le choix. Quelques indicateurs importants permettant de capter et intégrer le risque climatique dans l'évaluation du risque crédit ont été définis (secteur d'activité et de la localisation géographique, le score de survie d'évènement extrêmes, et l'intensité d'émission de carbone). Deux approches d'intégration du risque climatique ont également été présentées : une qui consiste à construire un score de conformité aux politiques environnementales par secteur d'activité qui sera pris en compte dans l'ajustement des paramètres de risque ; et une deuxième, celle retenue pour le cas pratique de l'article, qui consiste à traiter des facteurs climatiques directement dans le modèle statistique, en explorant les interactions et interdépendances entre facteurs et drivers de risque.

Dans la seconde partie de l'article un portefeuille d'entreprises, construit sur la base des rapports de Moody's et couvrant la période 1986 à 2020, a été utilisé pour intégrer le risque climatique dans la modélisation de la probabilité de défaut. Trois facteurs climatiques ont été intégrés dans le modèle pour saisir le risque climatique : la variation de température, proxy pour mesurer le risque physique, le niveau d'émission de CO₂ et la proportion d'énergie produite à base de sources renouvelables, proxy pour capter le risque de transition. Un modèle de régression logistique a été appliqué pour estimer les paramètres du modèle sans et avec inclusion des facteurs climatiques. Une comparaison des résultats a permis de montrer l'influence de l'intégration des facteurs climatiques dans la mesure

IV. Conclusion

Les premiers travaux de la BCE sur l'impact du risque climatique montrent que la nature particulière du changement climatique nécessite, à moyen et à long termes, des changements fondamentaux du cadre réglementaire, et que l'urgence de la situation appelle à la mise en place de mesures plus immédiates dans les approches de gestion des risques financiers liés au climat. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent article. Il a pour objectif principal de donner un aperçu de l'intégration quantitative

du niveau de risque d'une contrepartie. L'inclusion du risque climatique dans le modèle de probabilité de défaut réduit l'intensité de l'effet des drivers de risque tels que la localisation géographique ou encore les facteurs macro-économiques comme le taux de croissance du PIB. Exploration des interactions entre les facteurs climatiques et le secteur d'activité, permettait de montrer que, sur notre portefeuille, les facteurs climatiques modifient la structure de l'effet du secteur d'activité sur le niveau de risque de la contrepartie (changement de signe et d'intensité de l'effet de la variable). Après segmentation des vecteurs de score en classes de risque, une matrice de migration a été construite pour visualiser le changement des classes de risque des contreparties à la suite de l'inclusion des facteurs climatiques. Il en ressort que le modèle de probabilité de défaut ajusté du risque climatique apporte une modification significative dans la structure des classes de risque de notre portefeuille. Une analyse supplémentaire permet de montrer que, les contreparties des secteurs identifiés comme secteurs sensibles au risque climatique par les premiers travaux de l'ACPR de 2020 sont effectivement celles dont le niveau de risque se dégrade à la suite de l'ajustement du modèle par les facteurs liés au risque climatique. Nos résultats rejoignent donc le point de vue du régulateur sur la nécessité d'être plus concerné par le risque climatique.

Si ce travail apporte des conclusions intéressantes, reste à s'interroger sur la pertinence du cadre d'analyse. En effet, nous pensons que le choix des facteurs climatiques et le traitement de la corrélation de ces facteurs doivent se faire de façon plus approfondie en prenant en considération un ensemble de paramètres métiers propres à l'institution d'une part, en explorant les autres méthodes d'intégration du risque climatique dans un modèle d'autre part. De ce fait, explorer les données assurantielles ou faire appel à l'expertise des organismes assurantiels dans la modélisation du risque, par exemple, pourrait fournir des informations supplémentaires pour faciliter l'intégration du risque climatique dans les modèles de risque de crédit.

Cet article doit être considéré comme une piste de réflexion dans la réponse aux tests de résistance des banques face au changement climatique. Il pourra

être complété par des travaux de stress tests afin d'évaluer la robustesse des modèles aux changements climatiques futurs à travers les scénarios de la NGFS, recommandé par la BCE [12]. Nous projetons à cet effet d'étendre cet article par des travaux sur d'autres méthodes d'intégration du risque climatique dans les modèles de PD et des travaux de stress tests sur les différents modèles. Ces travaux feront l'objet de prochaines publications.

ANALYSIS
JANUARY 2021

Prepared by

Juan Licari
Juan.Licari@moodys.com
Managing Director

Petr Zemcik
Petr.Zemcik@moodys.com
Senior Director

Chris Lafakis
Chris.Lafakis@moodys.com
Director

Janet Lee
Janet.Lee@moodys.com
Director

Contact Us

Email
help@economy.com

U.S./Canada
+1.866.275.3266

EMEA
+44.20.7772.5454 (London)
+420.224.222.929 (Prague)

Asia/Pacific
+852.3551.3077

All Others
+1.610.235.5299

Web
www.economy.com
www.moodysanalytics.com

Climate Risk Macroeconomic Forecasting

INTRODUCTION

As early as 2021, many regulators across the world will require financial institutions to provide a self-assessment or to stress-test their balance sheets with respect to climate change risk. Constructing climate change scenarios starts with a trajectory for carbon dioxide emissions, the necessary policies to reduce these emissions, and the corresponding change in global temperatures. Moody's Analytics is expanding its capabilities to enable institutions to assess risks posed by climate change. The physical and transition impacts on the economy of temperature change are determined using our model of the global economy. Our scenarios are consistent with Orderly, Disorderly, and Hot House World scenarios by the Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System. We employ our modelling framework to generate climate change scenarios for the U.S. and the U.K.

Climate Risk Macroeconomic Forecasting

BY JUAN LICARI, PETR ZEMCIK, CHRIS LAFAKIS, AND JANET LEE

As early as 2021, many regulators across the world will require financial institutions to provide a self-assessment or to stress-test their balance sheets with respect to climate change risk. Constructing climate change scenarios starts with a trajectory for carbon dioxide emissions, the necessary policies to reduce these emissions, and the corresponding change in global temperatures. Moody's Analytics is expanding its capabilities to enable institutions to assess risks posed by climate change. The physical and transition impacts on the economy of temperature change are determined using our model of the global economy. Our scenarios are consistent with Orderly, Disorderly, and Hot House World scenarios by the Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System. We employ our modelling framework to generate climate change scenarios for the U.S. and the U.K.

More specifically, we first provide an overview of the relevant regulatory landscape, focusing on the U.K. and the U.S. We then summarize our methodological approach, which is complementary to scenarios produced by Integrated Assessment Models (see Table 1 for the list of acronyms). The approach leverages our modelling framework initially designed for standard macroeconomic forecasting and for producing stress-testing scenarios for various regulatory purposes. We then discuss how the framework is employed to account for the long-term physical risk associated with climate change and then altered to incorporate risks linked to the transition to a carbon-neutral economy. The newly constructed transition mechanism block includes a carbon dioxide tax in the system of simultaneous equations. Finally, we generate climate change scenarios for the U.K. and the U.S. consistent with published NGFS scenarios using the updated modelling setup.

Regulatory landscape

The Network for Greening the Financial System and the Task Force on Climate-Related Financial Disclosures are key organizations leading the global effort to assess the financial impact of climate risk. The NGFS is a group of central banks and regulatory agencies worldwide established at the Paris One Planet

Table 1: List of Acronyms

Acronym	Full title
BoE	Bank of England
BES	Biennial Exploratory Scenario
ECB	European Central Bank
GCAM	Global Change Analysis Model
IAM	Integrated Assessment Model
IPCC	Intergovernmental Panel for Climate Change
JFSA	Japanese Financial Services Agency
MAGPIE	Model of Agricultural Production and Its Impacts on the Environment
NGFS	Network of Central Banks and Supervisors for Greening the Financial System
ORSA	Own Risk and Solvency Assessment
RCP	Reactive Concentration Pathways
REMIND	Regional Model for Investment and Development
TCFD	Task Force on Climate-Related Financial Disclosures

Source: Moody's Analytics

Summit in December 2017.¹ Members include the Bank of England, Banque De France, the European Central Bank and the European Banking Authority, The People's Bank of China, and the European Insurance and Occupational Pensions Authority.² In December 2020, the Federal Reserve joined the NGFS as well. The TCFD is a taskforce set up by the Financial Stability Board, composed of over 785 influential organizations from around the world. They have been urging businesses across industries

to voluntarily measure and disclose their vulnerabilities to climate risk. Scenario-based risk analysis is an integral part to both the NGFS and TCFD's action plans.

The U.K. government has made significant steps towards assessment of the financial impact of climate risk. It has committed to ending coal sales, taxing carbon, and reducing emissions to net zero by 2050. It also closely follows recommendations of the U.K. Climate Change Committee and sets up five-year carbon budgets required by the Climate Change Act. In addition, the country will host the 26th United Nations Climate Change conference in Glasgow in November 2021. The key financial

¹ See <https://www.oneplanetsummit.fr/en>.

² The full list of members and observers is at <https://www.ngfs.net/en/about-us/membership>.

regulator, the Prudential Regulatory Authority (a part of the Bank of England), already published the contours of climate risk scenarios in its Insurance Stress Test guidelines in 2019. The climate change scenarios contain elements of both physical and transition climate change risks.³ Following the Insurance Stress Test, the PRA announced its intention to test the U.K. financial system's resilience to the financial risks from climate change as part of the 2021 Biennial Exploratory Scenario. The plan was outlined in the July 2019 Financial Stability Report.⁴ Finally, the U.K. Financial Conduct Authority has announced premium-listed companies to be subject to more detailed disclosures regarding how climate risk affects their business from January 2021. This announcement is consistent with the recommendations of TCDF. These are linked to environmental, social and governance factors for individual companies. The environmental factor reflects the vulnerability of companies to climate risk.⁵

The Bank of England indicated that it will use NGFS scenarios as the foundation for the Biennial Exploratory Scenario. In December 2020, it published an updated methodology of a 2019 discussion paper describing its intended approach.⁶ The BoE will supply integrated climate and macrofinancial variables. These will include projections for temperature, emissions and climate policies that incorporate the underlying physical and transition risks. The macrofinancial variables should be used to assess the impact of climate change. There will be NGFS scenarios characterizing outcomes under assumptions of the earlier and later policy actions, as well as the scenario with no policy change. These scenarios are discussed in detail in the subsequent sections of this paper.

While the U.S. has not been very active in terms of climate risk regulation in the last decade, Fed Chair Jerome Powell indicated the Fed would like to engage with NGFS in November

2020. The point man for financial regulation, Randal Quarles, echoed these comments later. On 15 December 2020, the Federal Reserve formally joined NGFS. The Financial Stability Report from November 2020 already listed climate risk as one of the risks to financial stability in the near future. It mentioned both chronic and acute physical hazards affecting the value of financial and nonfinancial assets, as well as volatility in sentiment.⁷ Earlier in September 2020, an advisory panel to the Commodity Futures Trading Commission released a report entitled "Managing Climate Risk in the U.S. Financial System." It is the first of its kind from a federal financial regulator and implies that proper pricing of carbon emissions in the U.S. will be required.

Other financial regulators across the globe have been active in climate risk regulation as well. The European Central Bank published its guide on climate-related and environmental risks for banks on 27 November 2020. In 2021, the banks regulated by the ECB will be required to conduct a self-assessment of climate risk exposure and formulate action plans reflecting the outcome of this assessment. A full supervisory review of banks' practices will be conducted in 2022. The European Insurance and Occupational Pensions Authority started a consultation process regarding the use of climate change risk scenarios in the Own Risk and Solvency Assessment in October 2020. Elsewhere, the Japanese regulator Financial Services Agency plans to include climate risk scenarios in a stress-test pilot for the country's five biggest banks. Similarly, the Monetary Authority of Singapore intends to include climate change scenarios in its stress-testing exercise within the next two years.

Climate risk scenarios

The climate change scenarios are similar in principle to the classical stress-testing ones

Chart 1: Economic vs. Climate Risk Scenarios

Differentiation btw standard forecasts and climate risk scenarios

Economic scenarios	Climate risk scenarios
<ul style="list-style-type: none"> 5- to 30-yr forecast horizon Used to measure capital and assess risk Shock inputs are provided by Moody's Analytics, clients or regulators Stable economic relationships Shock inputs do not depend on carbon dioxide trajectory 	<ul style="list-style-type: none"> 30- to 80-yr forecast horizon Used to assess risk Impact channels must be translated into shock inputs Increased uncertainty over how impact channels translate into economic inputs Increased uncertainty over how the economy transitions from fossil fuels to renewables Shock inputs depend on carbon dioxide trajectory Requires new forecast variables and model equations

Source: Moody's Analytics

(see Chart 1). They leverage existing macroeconomic models to generate projections of economic variables of interest. Following the Global Financial Crisis, the stress-test scenarios have now been fully embedded in the methodology toolkits of financial institutions across the world. The macroeconomic scenarios have been embraced by regulators, including central banks such as the Federal Reserve, the Bank of England, and the European Central Bank together with the European Banking Authority, and countless others. The stress scenarios have also been used for accounting standards for the Current Expected Credit Losses by the Financial Accounting Standards, and for the International Financial Reporting Standard by the International Accounting Standards Board. Due to the extensive employment of these scenarios, they have been standardized to some extent. The forecast horizon ranges from five years for the standard stress scenarios to 30 years for accounting standards, although most of the stress typically occurs during the first one to three years of the scenario.

However, there are several differences and corresponding challenges. First, the time horizon needs to be extended by decades. Moody's Analytics Global Macroeconomic Model, hosted on the web-based platform Scenario Studio, already generated projections for 30 years to accommodate accounting standards. However, the time horizon needs to be extended to 2100, which involves extending the projections of potential GDP paths and paying close attention to long-term demographic trends. A key attribute of climate risk modeling is the inclusion of the trajectory for carbon dioxide emissions. This projection is translated into a temperature path. Different temperature paths generate different physical risk and

³ SS3/19: Enhancing banks' and insurers' approaches to managing the financial risks from climate change April 2019.

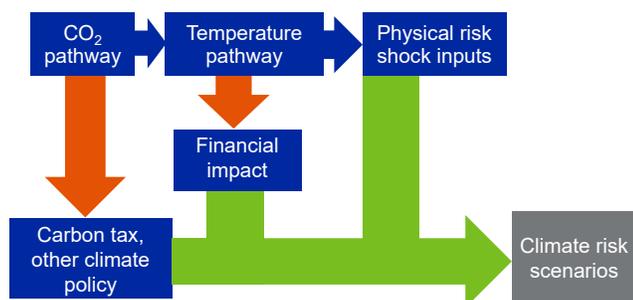
⁴ <https://www.bankofengland.co.uk/financial-stability-report/2019/july-2019>.

⁵ Moody's Analytics has acquired Vigeo-Eiris, a company that provides ratings for the ESG for some 5,000 companies. This will be enlarged to over 10,000 in 2021. Moody's Analytics will leverage on the existing ratings to estimate ESG scores for 100,000 non-rate companies.

⁶ The updated information is at <https://www.bankofengland.co.uk/climate-change> and the 2019 discussion paper can be found at <https://www.bankofengland.co.uk/paper/2019/biennial-exploratory-scenario-climate-change-discussion-paper>.

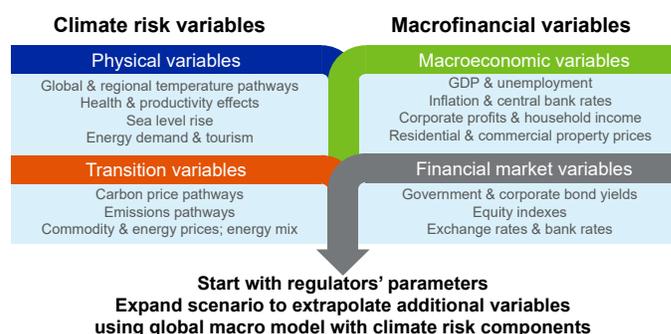
⁷ See the statement by Governor Lael Brainard at <https://www.federalreserve.gov/publications/brainard-comment-20201109.htm>.

Chart 2: Transition and Physical Risk



Source: Moody's Analytics

Chart 3: Constructing Climate Risk Scenarios



Source: Moody's Analytics

the subsequent impact on economic drivers. In addition, various government policies such as a carbon tax affect the speed with which the carbon dioxide paths are altered. These generate transition risks associated with each path.

Chart 2 illustrates how the transition and physical risks associated with climate change are incorporated into the macroeconomic modelling. The pathway for carbon dioxide determines the temperature pathway. Physical risk refers to the physical consequences of changing climate patterns, including rising sea levels, changing precipitation patterns, and changes in the magnitude and frequency of extreme weather events. These climate changes are the consequence of rising carbon dioxide emissions driving up global temperature. Transition risk associated with climate

change mitigation policies is embedded in the path for carbon taxes and other policies. This is combined with a financial impact linked to the timeline, according to which asset markets incorporate the climate risk in asset prices. This is often referred to as the Minsky moment⁸ as it can lead to instability and crisis. Once the physical, transition and financial impact is considered, we can generate the climate risk scenarios.

Note that the Moody's approach does not explicitly model either the conversion of the carbon dioxide pathway into the temperature pathway or the conversion of the temperature path into physical risks. These steps are typically addressed via a climate

⁸ According to economist Hyman Philip Minsky, who studied the stability of financial systems.

module that is part of the Integrated Assessment Models. For example, one of the scenarios generated by NGFS is produced by the Global Change Analysis Model that uses an Earth System Module – Hector v2.0. The Moody's approach differs from the IAM, as the objective is to provide a projection of the carbon tax consistent with a particular pathway of the carbon dioxide emissions. Moody's aims to construct forecasts of standard economic drivers consistent with various climate risk assumptions and the corresponding temperature pathways, using its Global Macroeconomic Model. Box 1 discusses in some detail the IAMs and elaborates on how the Moody's approach to climate risk complements the IAM modelling philosophy.

Box 1: Integrated Assessment Models

Our approach to constructing climate scenarios shares some features of the commonly used IAMs. For example, the GCAM employed by NGFS spans across socioeconomics; energy; agriculture, land use and bioenergy; water; climate; emissions; economic choice; trade and technology; and policies and costs.⁹ Another example of IAM is the Regional Model for Investment and Development, a Ramsey-type macroeconomic general equilibrium growth energy-economy model. It is combined with the Model of Agricultural Production and Its Impacts on the Environment.

These topics are captured by modules connected to describe how greenhouse gas emissions affect climate and how climate change affects the economy. The energy system serves as the conduit through which environmental and economic variables interact. Most IAM energy systems are detailed representations of the sources of energy supply, which subsequently determine emissions. Assumptions regarding population, labor productivity, technology characteristics and policies are used to provide outputs on emissions, prices, energy supply and demand, temperature, agricultural production, land use, and water use, among others. IAMs produce forecasts for these outputs in five-year intervals. Moody's Analytics uses output from these IAMs as an input into its scenario construction process. The main IAM inputs are fossil fuel consumption by source, temperature pathways and carbon prices.

⁹ See <http://jgcri.github.io/gcam-doc/toc.html>.

Chart 3 provides an overview of the construction of climate risk scenarios. The climate risk variables consist of physical variables such as the temperature pathways and the transition variables, including carbon dioxide emissions. The macroeconomic variables include core economic drivers such as GDP components, labor market metrics,

and key interest rates and prices. These are then used to produce projections of a wide range of financial market variables. In the Moody's approach, we assess the impact of the chronic physical risk separately, mainly via its impact on productivity and other variables. Newly, we have constructed variables to model and quantify the transition risk. The

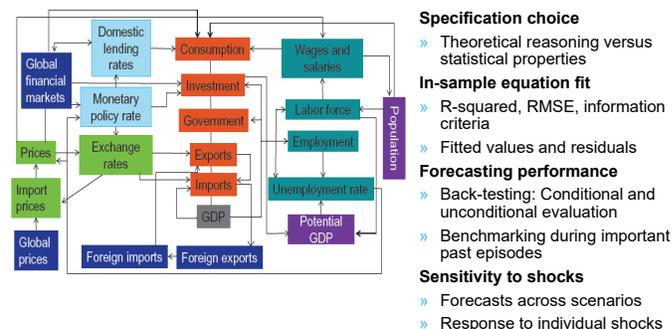
macroeconomic variables are generated by the Moody's Macroeconomic Model hosted on the web platform Scenario Studio (see Box 2). The macroeconomic variables are used as inputs together with additional assumptions regarding the timing of the Minsky moment to produce projections of a wide range of financial market variables.

Box 2: Moody's Global Macroeconomic Model

Generation of the climate risk scenarios relies on the Moody's Analytics Global Macroeconomic Model hosted on the web-based platform Scenario Studio. The model forecasts more than 15,000+ time series across 100 countries that collectively constitute more than 95% of global GDP. Model equations are specified based on economic theory, and they feature shock properties that are essential in scenario construction, including the creation of economic forecasts consistent with different climate change assumptions. The model captures both short-term business cycle dynamics and long-run trends. Short-term forecasts are determined by fluctuations in aggregate demand, whereas long-term forecasts are determined by an economy's labor force and labor force productivity growth. The model captures both interconnectiveness among economic regions and country-specific idiosyncracies. The linkages among countries and regions are characterized by trade and financial flows. The cross-country linkages include the impact of global prices and exchange rates on economic performance. While the model structure is similar across countries, the framework allows for country-specific variations of key equations and for the inclusion of tailpipe equations for variables important for some countries (see Chart 4).¹⁰

Chart 4: Our Global Macroeconomic Model

100+ country modules linked via trade and finance



Source: Moody's Analytics

¹⁰ For more details please see "Moody's Analytics Global Macroeconomic Model Methodology", M. Hopkins, Moody's Analytics March 2018. <https://tinyurl.com/y2ao8jga>

Physical risk

Climate change poses both physical and transition risks. Physical risk refers to the physical consequences of changing climate patterns, including rising sea levels, changing precipitation patterns, and changes in the magnitude and frequency of extreme weather events. Physical risks can be separated into chronic and acute. There are six primary components of chronic physical risk:

- » Sea level rise
- » Human health effects
- » Heat effect on labor productivity
- » Agricultural productivity effects
- » Tourism effects
- » Energy demand effects

Moody's Analytics already provides chronic physical risk scenarios that are available for all countries in the Global Macroeconomic Model through 2048 for four Reactive Concentration Pathways (RCP) by the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) (see Chart 5).¹¹

We create three new scenarios that are consistent with NGFS projections and modify our framework to incorporate chronic physical risk into our new scenarios. The most recent NGFS projections¹² are available for three scenarios: Orderly, Disorderly, and Hot House World. The Orderly and Disorderly scenarios assume that climate change policies

are adopted to limit the global warming to below 2°C. In the case of the Disorderly scenario, the transition starts only after 2030. The Hot House World scenario assumes no adaptation occurs. Stylized world-level carbon prices and emissions are illustrated in Charts 6 and 7. The corresponding temperature pathways are depicted in Chart 8.

Acute physical risk refers to weather events that could become increasingly likely or severe because of climate change. There are four primary components of acute physical risk:

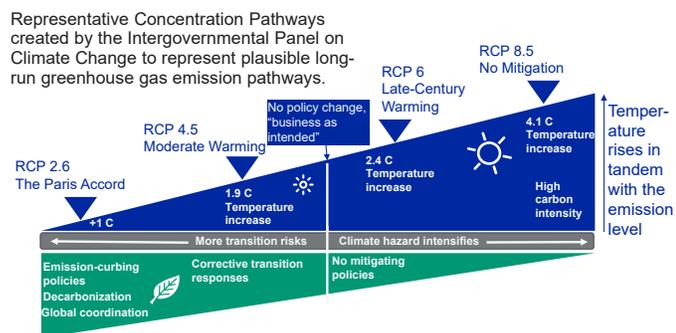
- » Heat waves and cold snaps
- » Droughts and wildfires
- » Flooding
- » Tropical cyclones

¹¹ For narratives for these scenarios, see "The Economic Implications of Climate Change", Chris Lafakis, Laura Ratz, Emily Fazio, and Maria Cosma, Moody's Analytics June 2019. <https://www.moodyanalytics.com/-/media/article/2019/economic-implications-of-climate-change.pdf>

¹² NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors, NGFS, June 2020.

Chart 5: IPCC Scenarios

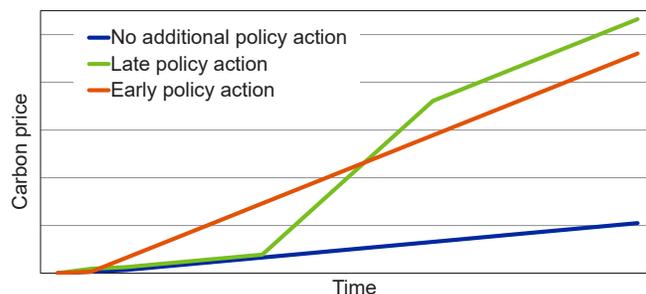
Greenhouse gas concentration levels define four distinct scenarios



Source: Moody's Analytics

Chart 6: Carbon Price (World)

Carbon price, US\$2010/metric ton CO₂



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Two approaches could be taken to model acute physical risk. The first is to quantify the link between rising temperatures and the economic cost of natural disasters by country. These costs could then be modelled over time as global temperatures rise in the upcoming BoE scenarios. This approach does not model an explicit natural disaster, but rather smoothes their cost over the forecast horizon. The BoE (as mentioned in its discussion paper) will also provide characterization of a distribution of key physical variables to capture changes in the frequency and severity of climate events at a granular regional level. The second approach is to model an explicit natural disaster occurring in a specific geography at a specific time that carries a specific intensity. Explicit modelling of the propensity towards acute physical risk requires climate risk data at a regional and postcode level. Moody's acquired a majority stake in Four Twenty Seven Inc., a provider of data,

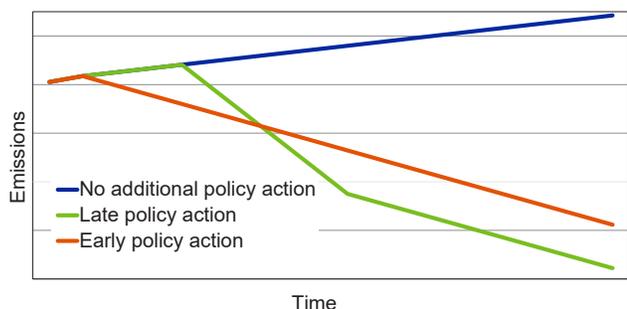
intelligence and analysis related to physical climate risks. Four Twenty Seven Inc. translates climate models into actionable intelligence for clients that include some of the world's largest investors, asset managers, commercial banks, development finance institutions, corporations, and government agencies. The "427" analytics engine leverages a wide range of data from various sources to generate climate risk impact data. This information will be incorporated in downstream models for regional drivers and credit risk assessment.

The physical risk impact estimates are synthesized by Roson and Sartori (2016),¹³ who report the impact on GDP for the six components of physical risk by country for increases in °C of +1, +2, +3, +4, and +5 for years 2050 and 2100. The sea level

¹³ Roberto Roson and Martina Sartori, Estimation of Climate Change Damage Functions for 140 Regions in the GTAP9 Database, World Bank Group Policy Research Working paper 7728, June 2016.

impact is reflected in private real consumption FC\$_GEO; agricultural and labor productivity, jointly with human health effects, impact real potential productivity FPROD\$_POT_IGEO; tourism demand affects net exports FNETEX\$_I_GEO; and energy demand impacts the Brent oil price FCPIFICEBOIU_US. Charts 9 and 10 summarize the impact channels for the physical risk as well as the remaining climate risk modelling components. Real consumption and net exports are expenditure components of GDP. Potential GDP and real average wage depend on real potential productivity, and many energy prices take oil prices into account. There are several options for incorporating the impact of the physical risk using the Moody's Global Macroeconomic Model. Two key ones are creating a series for add factors and exogenizing the series. As the physical impact is long term, we opt for the latter approach in this case.

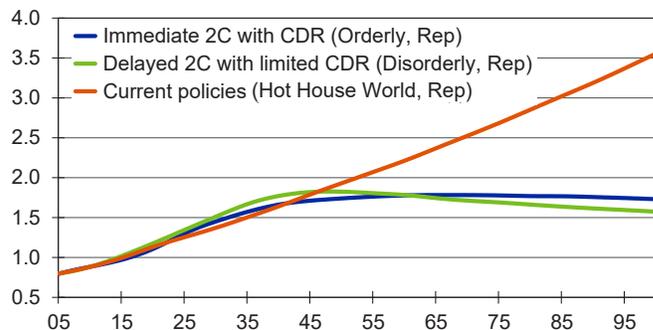
Chart 7: CO₂ Emissions (World)



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

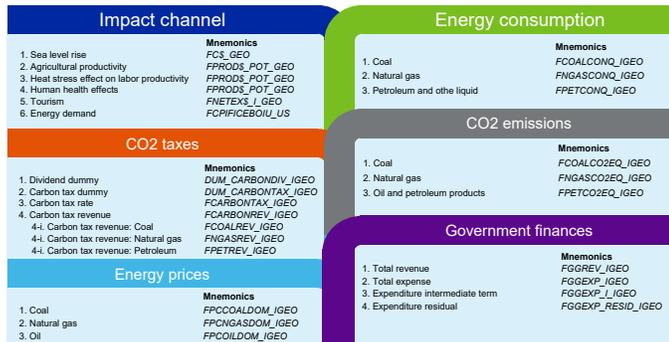
Chart 8: NGFS Scenarios

World temperature pathway (°C relative to 1850-1900)



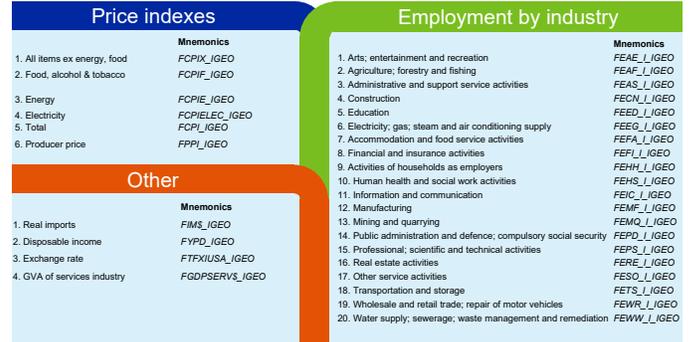
Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 9: Modelling Framework 1/2



Source: Moody's Analytics

Chart 10: Modelling Framework 2/2



Source: Moody's Analytics

Transition risk

Charts 9 and 10 include the key components of the transition risk modelling, in addition to the previously described approach, to take account of the aggregate physical risk. The first step in determining the impact of introducing the carbon tax in an economy is setting dummy variables for the carbon dividend and carbon tax in a country model embedded in the Moody's Global Macroeconomic Model. Using the U.K. model as an example, Appendix Table provides additional information for the blocks of equations described in the Modelling Framework in Charts 9 and 10. The table includes the mnemonics for these and other carbon tax-related variables. Following the standard employed in the Scenario Studio platform, which hosts the Moody's Global Macroeconomic Model, equations are stochastic, exogenous or identities. Stochastic equations contain an error term to capture randomness, and the projections are endogenously solved for in the system of all simultaneous equations in the Moody's Global Macroeconomic Model. Identities characterize basic relationships, and exogenous variables enable the user to set up a path based on information outside of the model.

Appendix Table also includes the relevant units and upstream and downstream dependence. For example, government expenditures and household disposable income depend on the dividend dummy variable. The impact of the transition is triggered by imposing taxes on carbon dioxide for the key sources of energy such as coal, natural gas and petroleum. The usage of the tax rate is indicated via the carbon tax dummy and the corresponding tax rate. Prices of coal, natu-

ral gas and petroleum depend on the carbon tax rate and so does government revenue for the three fossil fuels. The carbon tax rate is imposed exogenously based on assumptions regarding a government's climate change policy. Imposing the carbon tax rate results in the corresponding revenue. The equation for the revenue is a simple identity, where the revenue equals the dummy variable multiplied by the tax rate and the amount of emissions. This revenue is also added to the government budget.

The subsequent block of transition risk equations characterizes energy prices. Specifically, these include the average price of coal, the effective domestic natural gas price, and the effective domestic oil price. All three energy prices depend on the dummy variable for the carbon tax rate as well as the carbon tax rate. The price of natural gas also depends on the exchange rate, and the price of oil on the price of Brent crude. Consumption of all three fossil fuels and consumer prices for energy and electricity reflect the energy prices. The price of oil also affects gross value added in industries such as electricity, gas, steam and air-conditioning, and mining and quarrying. Imports and the producer price index depend on oil prices as well. Besides energy prices, energy consumption depends on industrial production for natural gas, and household disposable income and motor vehicle registration for passenger cars. Energy consumption mainly determines the emissions for each of the fossil fuels plus global demand for petroleum. There is essentially a one-to-one correspondence between the growth rates of energy consumption and emissions. These are captured by a simple regression equa-

tion which also includes autocorrelation in error terms.

Including the carbon dioxide tax has implications for government finances. Overall tax revenue depends on tax income reflecting the GDP level and the revenue from the carbon tax. Expenditures depend on the carbon dividend dummy as well as the carbon tax revenue. Many other factors have an impact on government finances, including the current interest expense on existing government debt and the debt-to-GDP ratio. The government budgetary metrics determine government spending as a part of GDP, which completes the endogenous loop for the simultaneous equations model.

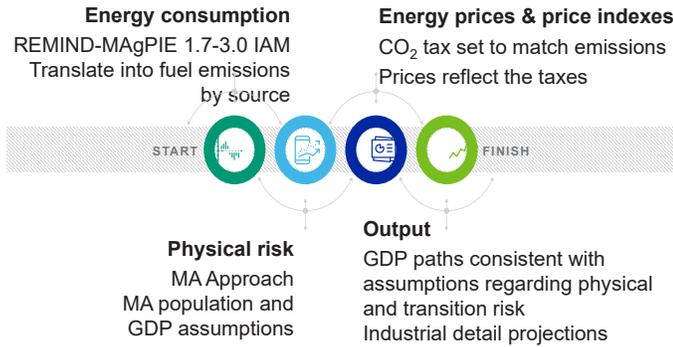
The consumer energy price index depends on the prices of oil, natural gas and electricity. The electricity price depends on the price of gas and coal. The overall price index depends on energy prices as well as on a variety of other factors such as the unemployment rate and inflation expectations. The producer price index depends on the oil price.

The key variables that are impacted by the block of climate transition risk equations are real imports via the effective domestic oil price; disposable income via the carbon dioxide tax revenue and indirectly via government expenditures; indirectly the exchange rate and gross value added for industries. The GVA is one of the drivers of employment in each of the 20 industries.

Moody's Analytics NGFS scenarios

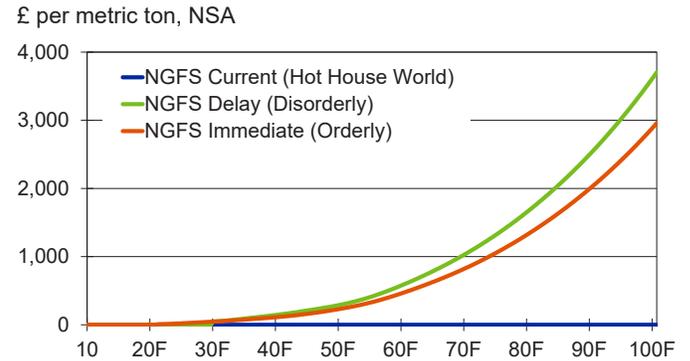
In this section, we show how we are calibrating to the NGFS scenarios and discuss the key results generated by the Moody's Analytics

Chart 11: NGFS Consistent Scenarios



Source: Moody's Analytics

Chart 12: U.K. Carbon Dioxide Tax Rate



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Global Macro Model. In general, we also follow guidelines by the BoE in its BES discussion paper mentioned above, although we go beyond these in a number of ways. For example, the BoE forecast horizon is 2050 while it is 2100 in our case. The BoE leverages on the NGFS projections at a five-year frequency, while we have produced datapoints at quarterly frequency to allow time series analysis with standard macrofinancial variables.

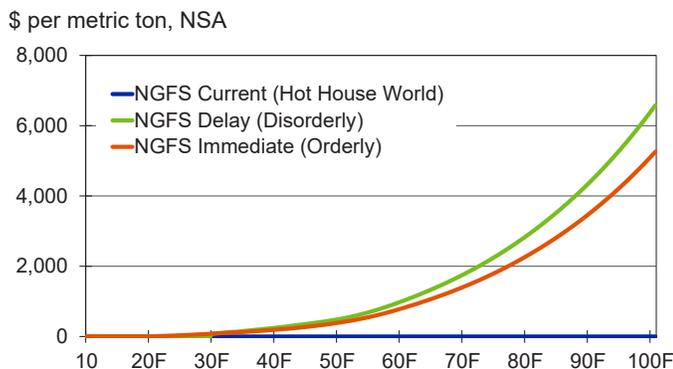
The forecasted series shown here all include the impacts from both transition and chronic physical risk, derived using the methodology discussed in detail in the earlier sections. The NGFS publishes results for three representative scenarios and five alternative scenarios using three different IAMs: GCAM 5.2, REMIND-MAgPIE 1.7-3.0, and MESSAGE ix-GLOBIOM 1.0. This creates a challenge in the calibration process. First, the population and GDP figures are different in the historical period of 2005 to 2020 for different models. Therefore, the

starting point across scenarios will not be the same if we calibrate to the NGFS marker scenarios. Second, NGFS suggested calculating the mitigation cost expressed as a loss of GDP between two scenarios by subtracting GDP in one scenario from the other for REMIND-MAgPIE and MESSAGEix-GLOBIOM. Calibrating to the marker scenarios will not allow us to calculate the mitigation cost as suggested by NGFS. Finally, only for the REMIND-MAgPIE 1.7-3.0 IAM model does the NGFS publish results for all three of its representative scenarios—Hot House World, Disorderly, and Orderly. The NGFS therefore recommends that all scenario analysis exercises be conducted using the same model. Following this recommendation, and for the sake of consistency across scenarios, we have used the NGFS-provided output from REMIND-MAgPIE 1.7-3.0 to construct our climate risk scenarios.

Chart 11 summarizes the adopted process to produce scenarios consistent with NGFS.

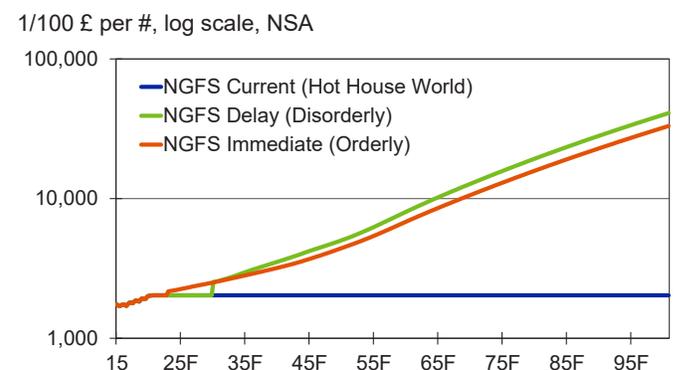
We match energy consumption translated into fuel emissions by source. For the physical risk, we apply the Moody's Analytics approach including the assumptions with respect to projections of population and GDP. For transition risk, we have opted to match energy consumption and emissions, as they are well defined, while the GDP paths published by NGFS depend on assumptions with respect to population and other variables that are inconsistent with ours. We also use the NGFS carbon price trajectories and our model to produce forecasts for domestic energy prices, which simultaneously interact with other model variables to produce our full set of macroeconomic forecasts. Ultimately, the ranking of our GDP paths is similar to those of the NGFS, though there are differences in absolute levels. The end product is a set of macroeconomic scenarios consistent with NGFS assumptions on fossil fuel usage, carbon emissions, and carbon prices.

Chart 13: U.S. Carbon Dioxide Tax Rate



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

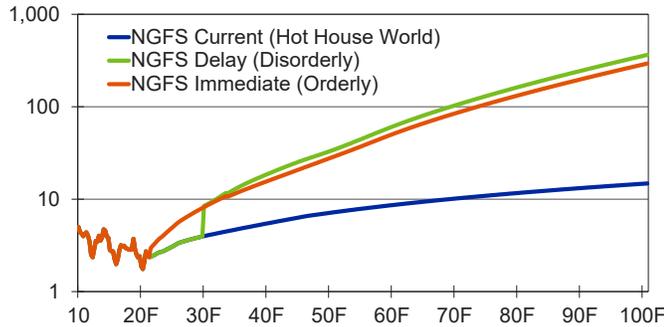
Chart 14: U.K. Effective Domestic Price: Coal



Sources: U.K. Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Moody's Analytics

Chart 15: U.S. Effective Domestic Price: NG

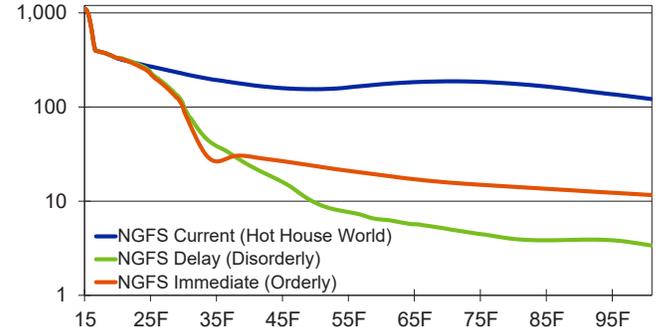
\$ per mmBTU, log scale, SA



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 16: U.K. Energy Consumption: Coal

BTU, tril, log scale, SAAR



Sources: U.S. Energy Information Administration, Moody's Analytics

Charts 12 and 13 summarize the U.K. and U.S. carbon tax rate until 2100 for the three NGFS representative scenarios. For each scenario, we calibrate the carbon tax pathway to match the carbon tax trajectory generated by the REMIND-MAGPie IAM model used by NGFS. In the Orderly scenario, the carbon tax is put into effect starting in the third quarter of 2021, and the carbon tax rate rises overtime, with the increase significantly intensifying in the second half of the century. In the Disorderly scenario, the carbon tax is not implemented until the first quarter of 2030, and because of the late start, the carbon tax rate needs to be higher than the immediate scenario in order to make up for the lost time. In the Hot House World scenario, the carbon tax rate is zero since no additional future action will be taken to mitigate climate risks.

The carbon tax will raise the effective domestic energy prices of fossil fuels tremendously. Charts 14 and 15 show that prior to 2030, energy prices for U.K. coal and U.S.

natural gas in the Disorderly scenario are the same as in the Hot House World scenario, but they will rise rapidly and exceed the Orderly scenario starting in 2030. By 2100, the U.K. effective domestic coal price in the Orderly and Disorderly scenarios will be more than 15 times the Hot House World scenario, and a similar pattern holds for the U.S. effective domestic natural gas price. Since the carbon tax is levied per metric ton of emission, it will have a larger impact on coal than on natural gas because coal has a higher CO₂ emission factor.

As a result of the very large carbon tax rate imposed in the Orderly and Disorderly scenarios, fossil fuels consumption will fall dramatically. Chart 16 shows that U.K. coal consumption will be driven to near zero in the Orderly and Disorderly scenarios, and without the carbon tax, U.K. coal consumption will continue its long-term decline, but will not fall to zero by 2100 in the Hot House World scenario. U.S. natural gas

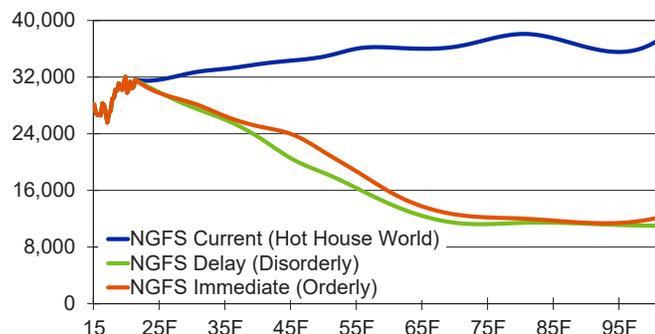
consumption in Chart 17 is projected to rise steadily in the Hot House World scenario, but in the the Orderly and Disorderly scenarios it is projected to decline by over 50% in 2100.

After calibrating to the NGFS carbon tax and fossil fuels consumption pathway, and adjusting for the effects of chronic physical risk for the U.K.¹⁴ and the U.S., we use the Moody's Analytics Global Macro Model to generate the full scenario pathway for the U.K., U.S., and the rest of the global economy. The scenario outputs are the entire suite of economic and financial variables currently in the Moody's Analytics Global Macro Model universe. Charts 18 and 19 show the projected percentage loss in real GDP between scenarios. Since the impacts of chronic physical risk are small and almost negligible for the U.K. and

¹⁴ Since the U.K. is not a separate region in the NGFS scenarios, we calibrate the U.K. using the carbon tax rate and fossil fuels consumption pathway for the EU as a proxy.

Chart 17: U.S. Energy Consumption: NG

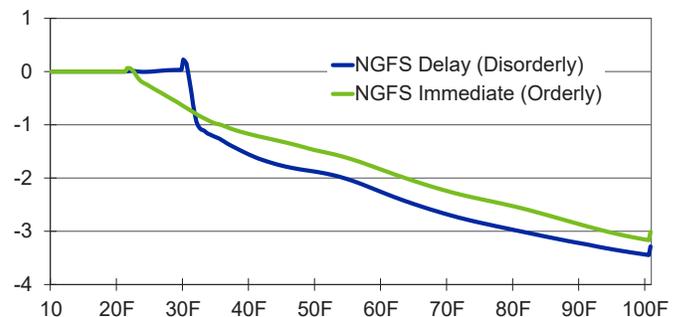
Ths, short tons, SAAR



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 18: U.K. Real GDP Scen Comparison

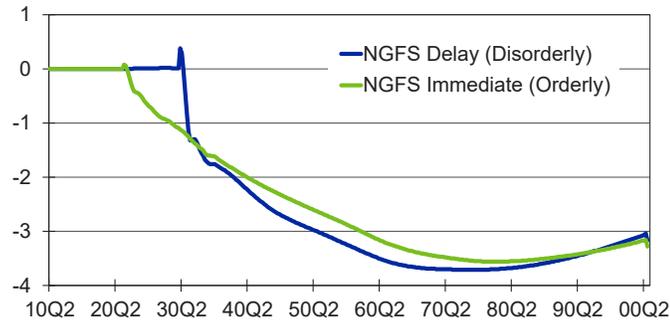
% deviation from NGFS current



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 19: U.S. Real GDP Scen Comparison

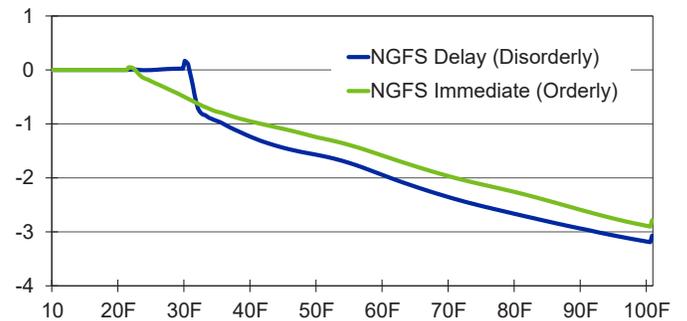
% deviation from NGFS current



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 20: U.K. GVA Svcs Industry Scenario

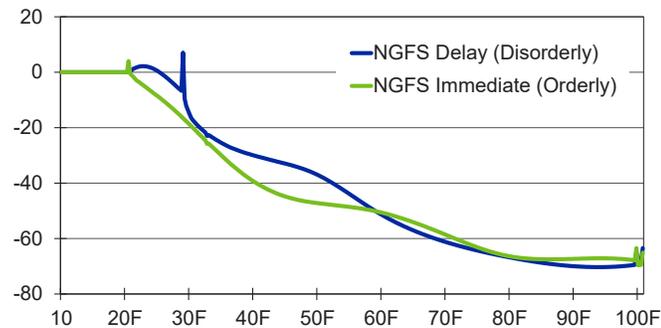
% deviation from NGFS current



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 21: U.S. GPO Mining Industry Scenario

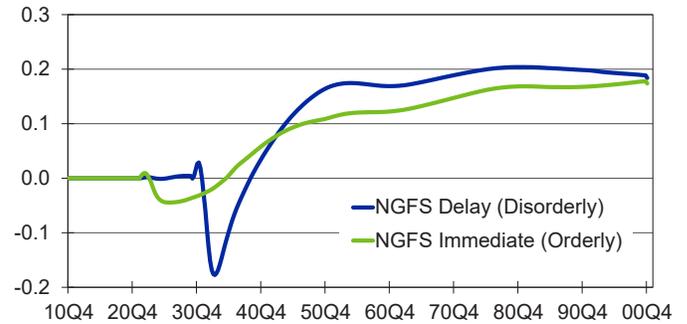
% deviation from NGFS current



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 22: U.K. Employment Services Industry

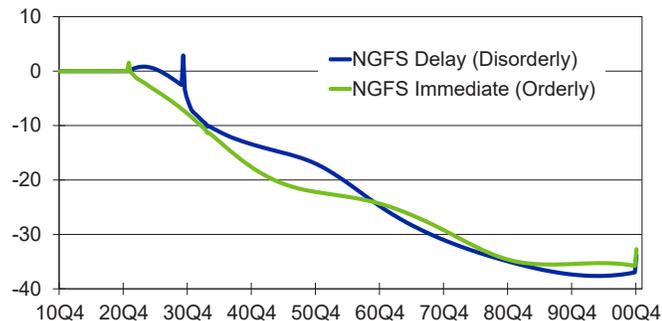
% deviation from NGFS current



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 23: U.S. Employment Mining Industry

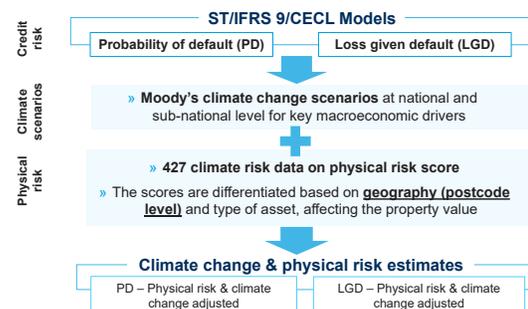
% deviation from NGFS current



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

Chart 24: Climate Risk Sensitivities

Climate change and credit risk



Sources: Network for Greening the Financial System, Moody's Analytics

the U.S., losses in real GDP for these two countries are mostly due to transition risk alone. The percentage losses calculated from the Moody's Analytics Global Macro Model are similar to the estimates from REMIND-MAGPie. For the U.K., the peak loss occurs at around 3% in 2100, and for the U.S., the peak loss occurs earlier in 2070 at almost 5%, and the loss becomes smaller after that. Other than the initial period in which the carbon tax is put into effect, real GDP is consistently lower in both the Orderly and Disorderly scenarios when compared with the Hot House World scenario. In the initial period, the economy gets an immediate boost due to the collection and distribution of the carbon tax revenue, which raises real GDP. In the Orderly scenario, GDP loss occurs right away in 2021, and in the Disorderly, GDP loss occurs in 2030 after the carbon tax is implemented and exceeds the loss level in the Orderly scenario throughout the forecast period.

GDP loss at the aggregate level may give a false impression of the full impact from transition risk for individual industries. In transitioning to a low carbon economy, there needs to be a substantial reallocation of resources, and the inflation pressures from energy prices will affect industries and sectors differently. High-risk industries such as mining and utilities will be hit much harder than low-risk industries such as professional services. Charts 20 and 21 show the projected percentage losses in gross value added for the U.K. service-providing industry and the gross

product originating for the U.S. mining industry. Not surprisingly, the difference between industries is huge. The U.K. service-providing industry is expected to incur a peak loss in output of 3% by 2100, slightly lower than the percentage loss in aggregate GDP, whereas the U.S. mining industry is expected to suffer a peak loss of well over 60% when compared with the Hot House World scenario. Industry employment tells a similar story. The U.K. service-providing industry is virtually unaffected, with employment loss hovering around 0%, while the U.S. mining industry is projected to experience a nearly 40% reduction in employment in both the Orderly and Disorderly scenarios (see Charts 22 and 23).

Summary

The financial industry has been gearing up to address the challenges of assessing climate risk. The starting point of this assessment is the generation of climate change scenarios. Moody's Analytics has developed a framework to complement and expand scenarios provided by various regulators and often produced using IAMs or other types of models with heavy emphasis on climate modelling. The Moody's framework leverages its well-tested Global Macroeconomic Model, which has been used to produce macroeconomic scenarios for stress-testing and other regulatory purposes. We have presented a methodology that enables us to include the long-term physical climate change risk in the scenario generation process. The Global Macroeconomic

Model has been enhanced by several blocks of equations at the country and industry levels to incorporate transition risk to a zero-carbon economy. The transition risk approach is based on a path of the carbon dioxide tax that affects energy prices and subsequently the overall price level. The simultaneous equations model of the global economy is then solved for all standard macrofinancial variables, including the newly added transition drivers. We use this upgraded framework to produce NGFS consistent scenarios for the U.S. and the U.K. These scenarios are also in general consistent with the BoE BES that also employ NGFS climate change scenarios.

The climate change scenarios are used as input and the first step in the credit risk assessment of portfolios of financial institutions. They are further combined with facility-level data such as the previously discussed physical risk scores by 427 (see Chart 24). The data requirements are similar to standard stress-testing and/or IFRS 9/CECL type calculations. These data inputs are used to generate projections of risk parameters such as probability of default, loss given default, and the corresponding expected credit losses. The analysis of instrument-level performance based on the portfolio data snapshots, combined with facility-level climate risk score from 427, will result in adjustment factors for PDs and LGDs to account for the climate change risk. The output includes a variety of instrument-level metrics combined with the adjustment factors.

Il convient d'élargir, dans un cadre rigoureux, le champ des missions de la BCE à l'atténuation climatique

L'économiste François Meunier plaide, dans une tribune au « Monde », pour que la Banque centrale européenne puisse user de l'arme monétaire au bénéfice des investissements « verts ».

La Banque centrale européenne (BCE) ne reste pas inactive face à la montée des risques climatiques, consciente qu'elle est de leurs conséquences sur la stabilité financière et sur l'inflation, les deux domaines au cœur de son mandat. Mais les mesures qu'elle met aujourd'hui en œuvre restent très limitées au regard de l'énormité de l'enjeu. Aller plus loin lui est difficile et l'oblige à ruser, à chercher tout interstice possible dans le texte-même du mandat qui lui est donné formellement par les traités européens.

Il est temps qu'elle dispose d'un appui politique pour introduire davantage la dimension du climat dans son action. C'est pourquoi on doit saluer qu'un dirigeant européen en fasse mention explicite pour la première fois. Dans son discours du 25 avril à la Sorbonne, le président Macron a déclaré qu'« *il s'agit d'intégrer dans les objectifs de la BCE au moins un objectif de croissance, voire un objectif de décarbonation, en tout cas de climat* ».

Aujourd'hui, la BCE dispose de quelques outils : préférence pour des titres « verts » dans ses opérations de portefeuille et de prises en garantie, exigence de divulgation des risques climatiques portés par les banques, *stress tests* sur la base de scénarios climatiques extrêmes. Elle souhaite aller plus loin, mais à ce jour elle trébuche sur le pas le plus décisif et que beaucoup jugent le plus efficace, à savoir moduler le coût de l'activité de crédit des banques selon son caractère plus ou moins vert.

Plus de souplesse pour verdir les investissements

Deux modalités existent à cet égard : une charge en capital plus ou moins lourde imposée aux bilans bancaires, ou un taux de refinancement plus ou moins bas selon la nature verte ou brune du prêt. Plusieurs ONG et universitaires en ont appelé à cette seconde option dans une « Lettre ouverte au président Macron » publiée par *Le Monde* en décembre 2023, et qui a peut-être trouvé un écho dans le discours de la Sorbonne.

L'une et l'autre de ces mesures s'assimileraient à une sorte de bonus-malus, très proche dans ses effets d'une taxe carbone, si ce n'est qu'elles affecteraient les coûts financiers plutôt que les charges opérationnelles des entreprises et, il faut le noter, de façon plus silencieuse et probablement mieux politiquement tolérée que la taxe carbone.

Il y a dans les deux cas un avantage de souplesse dans l'incitation d'une entreprise à verdir ses investissements, préférable au schéma binaire qu'on voit aujourd'hui consistant à les « définancer » brutalement dès qu'on juge (qui ? selon quel mandat ?) leur activité trop mêlée au carbone.

Risques bancaires

Les deux mesures peuvent arguer de précédents. À la suite de la grande crise financière de 2008, le Conseil et le Parlement européens craignaient que les PME soient coupées du financement bancaire. Ils ont imposé que la BCE instaure un « *facteur de soutien* » pour les prêts à destination des PME. On envisageait même une réduction de 25 % de la charge en capital pour les projets d'infrastructure -or les projets verts sont souvent des projets d'infrastructure-.

De même, la BCE avait introduit en 2019 des taux différenciés sur les prêts octroyés dans le cadre de son programme d'« opérations ciblées de refinancement à plus long terme ». Certains économistes opposent à cette idée que la Banque centrale ne doit pas pratiquer des taux discriminés, qui pourraient interférer avec la politique monétaire (« *Central bank mandates, sustainability objectives and the promotion of green finance* », Simon Dikau et Ulrich Volz, *Ecological Economics*, n° 184, 2021).

Si le risque climatique pèse sur le bilan des banques commerciales, c'est à leur niveau qu'il faut le mesurer et lui donner un prix, argumentent-ils. Le problème est que les modèles de mesure des risques bancaires sont toujours calés sur des risques avérés, c'est-à-dire sur un historique et non pas sur une vue prospective de ce qui peut advenir dans dix ou quinze ans. Et à cette aune, en effet, les risques décelés sont minimes, si énorme et plausible le chaos climatique puisse-t-il apparaître.

Ouvrir un dialogue avec les instituts statistiques

Il n'y a à vrai dire rien de très nouveau dans ces débats, si ce n'est que certains banquiers centraux, notamment à la très sage Bundesbank, s'inquiètent face au dilemme du risque inflationniste. En effet, la transition climatique suppose des investissements énormes pour verdir les produits, modifier les technologies, en mettre certaines au rebut, adopter des pratiques culturelles différentes -autant d'actions qui vont se répercuter sur le prix des produits-. Au point de voir apparaître un nouveau terme : l'« inflation verte ».

Or, devant une telle hausse des prix, les banquiers centraux feront ce qu'ils savent et doivent faire par mandat, à savoir casser la hausse en relevant les taux d'intérêt. Mais c'est la mesure la plus nocive qu'on puisse imaginer, puisque cette même transition exige des coûts de financement modérés pour être menée à bien !

Il faudrait alors ouvrir au plus vite un dialogue avec les instituts statistiques afin qu'ils comptent, dans le calcul de l'indice des prix, l'amélioration verte du produit comme un « effet qualité » plutôt que comme une hausse du prix, et sur cette base ne pas le reprendre dans l'indice. C'est d'ailleurs ce qui est mis en œuvre tous les jours sur le marché des actifs financiers : si l'investisseur accepte de payer plus cher une obligation verte, c'est bien parce qu'il lui reconnaît un plus qui le pousse à payer une prime verte (*green premium*).

Juger de l'inflation et de sa dimension climatique

La BCE saura-t-elle convaincre les instituts statistiques, dont Eurostat et l'Insee, de cet argument ? Peut-être. Mais il serait préférable que la BCE ait les coudées plus franches pour juger de l'inflation et de sa dimension climatique. La BCE doit pouvoir lutter contre l'inflation, même si une partie de celle-ci est la conséquence directe d'un mouvement, le « verdissement », qu'elle entend justement favoriser.

Dans le cadre de son présent mandat, elle n'a pas l'aisance requise pour agir comme il le faudrait. Là est l'urgence d'un appui politique venant du Conseil et du Parlement européens et, mieux encore, mais plus compliqué bien sûr, d'une modification des traités.

Il convient d'élargir, dans un cadre rigoureux, le champ des missions de la BCE à l'atténuation climatique et de lui laisser trouver les moyens les plus appropriés à cette fin. Les températures et les niveaux marins montent d'année en année. Faut-il autre chose pour nous en persuader ?

François Meunier
Économiste à l'ENSAE - Institut Polytechnique de Paris

La Banque de France lance un consortium de modélisation macroéconomique sur les risques liés à la nature

La Banque de France annonce la création d'un consortium français de modélisation consacré à l'étude des canaux de transmission macroéconomiques des risques liés à la nature. Son objectif : renforcer les capacités de modélisation des acteurs académiques et des institutions économiques françaises, afin de mieux représenter les effets de la dégradation du capital naturel (forêts, sols, océans, biodiversité) sur l'activité économique et la stabilité financière, mais aussi l'impact de l'activité économique sur cette dégradation.

Ce projet de recherche pluriannuel résulte d'un partenariat entre la Banque de France et les laboratoires du CREST, de Polytechnique, du CIRED, de PSE (i-MIP), ainsi que la Fondation pour la recherche sur la biodiversité. Il entend créer une dynamique ambitieuse, collaborative et ouverte, au sein de l'écosystème de recherche économique français.

Ces travaux de modélisation se concentreront sur la France, en intégrant à la fois les risques affectant directement son territoire et les risques importés, liés aux chaînes d'approvisionnement mondiales et aux interdépendances avec ses partenaires commerciaux et voisins.

L'effondrement progressif des écosystèmes naturels, déjà largement documenté, constitue un risque systémique majeur encore peu intégré dans les outils d'analyse économique traditionnels. La disparition des services écosystémiques -pollinisation, régulation de l'eau, fertilité des sols- peut affecter durablement les chaînes de valeur, la productivité et la sécurité alimentaire, y compris à des niveaux matériels du point de vue macroéconomique.

Ce nouveau programme s'appuiera sur les travaux pionniers menés par le Réseau des banques centrales et superviseurs pour le verdissement du système financier (NGFS), qui a déjà proposé des recommandations pour le développement de scénarios macroéconomiques liés à la nature¹, ainsi que sur un document de travail de la Banque de France proposant une revue critique des outils de modélisation disponibles actuellement² ; et il contribuera à leur approfondissement.

« Dans le contexte international actuel, nous, Français et Européens, devons maintenir l'ambition face à des risques environnementaux scientifiquement avérés et dont les impacts économiques sont significatifs », affirme Agnès Bénassy-Quéré, Seconde Sous-Gouverneur de la Banque de France. « Nous sommes fiers aujourd'hui de lancer avec tous nos partenaires ce consortium français, qui nous permettra de développer les travaux de recherche et de modélisation sur la nature, et ainsi de mieux l'intégrer dans nos analyses macroéconomiques, et dans notre politique économique. »

¹ *Recommendations toward the development of scenarios for assessing nature-related economic and financial risks*, NGFS, 2023, consultable sous ce lien.

² *Assessing Integrated Assessment Models for Building Global Nature-Economy Scenarios*, Salin et al., 2024, Document de travail Banque de France n°959, consultable sous ce lien.

Comment modéliser le risque de transition ?

Introduction

Changements climatiques : pourquoi le risque de transition nécessite l'apport de la recherche académique ?

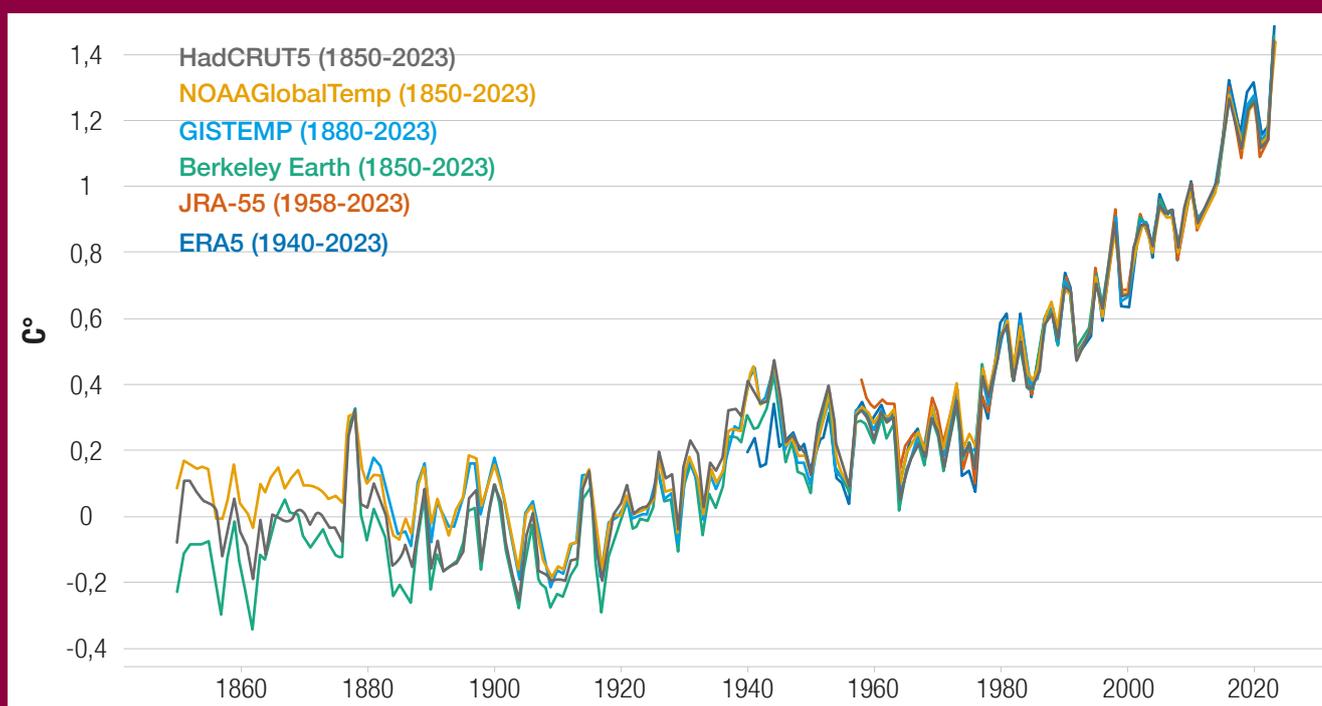
L'Institut Louis Bachelier (ILB), soutenu par l'Institut pour la recherche de la Caisse des Dépôts, a pour mission d'amplifier l'impact de la recherche et de la modélisation en finance pour une gestion optimale des ressources et des risques dans l'économie de demain. À ce titre, l'ILB, organisé en réseau, **héberge plusieurs programmes de recherche portant sur la thématique spécifique de la transition environnementale**, notamment la fondation abritée PARC (Paris Agreement Research Commons) lancée début 2024, les Chaires Finance Durable et Investissement Responsable, Finance et Développement Durable, Énergie & Prospérité ou encore Économie du climat. Dans ces différents travaux de recherche académique, les objectifs

consistent, entre autres, à **promouvoir et à développer l'analyse et l'évaluation des politiques publiques, ainsi que les instruments financiers actuels et futurs favorisant la transition environnementale**. En outre, l'ILB organise plusieurs événements pour présenter les travaux de recherche, notamment la conférence internationale Green Finance Research Advances (GFRA), avec la Banque de France, qui se déroule chaque année en décembre, à Paris. Ce présent cahier de recherche est basé sur des travaux de Louis Daumas (voir encadré biographie), dont une partie ont fait l'objet de présentations lors de plusieurs événements académiques, notamment la conférence GFRA en 2022.

En dépit de l'adoption de l'Accord de Paris par 196 pays, en décembre 2015 et entré en vigueur en novembre 2016, visant à limiter la hausse des températures à 2 degrés Celsius, voire 1,5 degré d'ici à la fin du siècle, **le réchauffement climatique se poursuit et ses conséquences se font, hélas, davantage ressentir**. D'après l'Organisation météorologique mondiale (OMM),

les huit années les plus chaudes ont toutes été enregistrées depuis 2015. Dans un récent rapport, cet organisme des Nations-Unies a indiqué que **l'année 2023 a été la plus chaude jamais enregistrée**, avec une température moyenne à la surface du globe de 1,45 degré au-dessus du niveau de référence de l'ère préindustrielle.

Différence de température moyenne globale (°C)
Par rapport à la moyenne de 1850-1900 • source : OMM



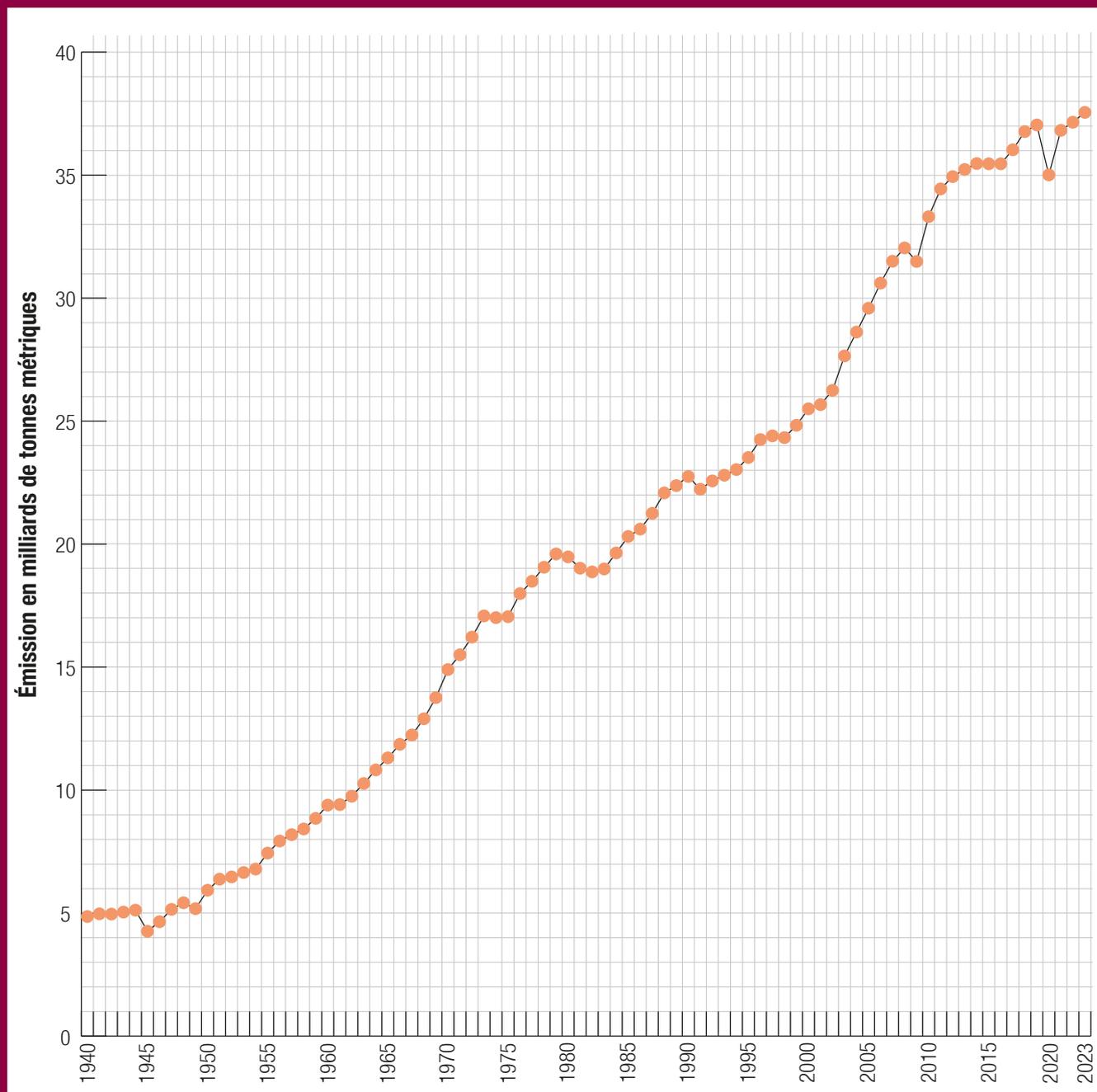
Dans ce contexte, les événements météorologiques extrêmes (vagues de chaleur, inondations, sécheresse, ouragans...) sont plus intenses et surviennent à une fréquence plus élevée. La trajectoire de limitation des températures fixée par l'Accord de Paris semble déjà hors d'atteinte, selon les projections du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

Pour ne rien arranger, les émissions de carbone d'origine fossile poursuivent chaque année leur progression, après une légère accalmie en 2020, l'année de démarrage de la pandémie de Covid-19.

La situation est alarmante.



Émissions annuelles de dioxyde de carbone (CO₂) dans le monde de 1940 à 2023 • source : Statista



Quelles sont les différences entre le risque physique et le risque de transition ?

Dans ce contexte inquiétant, le système financier est particulièrement vulnérable. S'il fait consensus que le secteur financier doit contribuer massivement à la transition écologique en réorientant les flux financiers vers des projets favorables à une économie bas-carbone, il est également en première ligne face aux risques liés aux changements climatiques. Ainsi, deux grands types de risques climatiques financiers ont été identifiés :

> **Le risque physique** correspond aux pertes et aux dommages sur les acteurs économiques causés par le climat. Ce risque peut toucher, par exemple, des entreprises ayant des actifs (comme des usines) dans des zones susceptibles de subir des aléas météorologiques, des assureurs subissant une hausse de leur sinistralité et donc une augmentation

des indemnisations à fournir à leurs assurés, ou encore des banques ayant accordé des prêts à des entreprises affectées par le climat. Toutefois, si le risque physique peut engendrer des pertes considérables - **en 2022, le coût des catastrophes climatiques a atteint 255 milliards d'euros dans le monde dont plus de 10 milliards en France** - il reste tout de même assez simple à appréhender sur le plan conceptuel dans les modélisations (voir encadré ci-dessous). Ces dernières incluent ainsi une fonction classique de dommage plus ou moins sophistiquée qui dépend de variables climatiques. En revanche, ce n'est pas le cas du second risque ci-dessous, qui est plus complexe à cerner et nécessite davantage de recherche de la part des régulateurs, des académiques et des acteurs concernés (pouvoirs publics, secteur privé).

Les modélisations classiques du risque physique

Si le risque physique se modélise toujours à partir d'une fonction de dommage, les modélisations peuvent prendre deux angles distincts :

- **L'angle microéconomique** consiste à évaluer des dommages climatiques possibles sur des actifs, notamment par le biais du modèle d'évaluation des actifs financiers (MEDAF ou CPAM en anglais), en y incorporant plus ou moins de risques et de chocs en fonction de lois de probabilités. Il est également possible d'y inclure de l'incertitude dont on ne connaît pas les probabilités et plus ou moins d'ambiguïté qui s'apparente à de l'incertitude radicale, c'est-à-dire sans aucune probabilité mesurable. L'objectif étant d'estimer la prime de risque d'un actif associée aux dommages climatiques.
- **L'angle macroéconomique** vise à établir des liaisons entre les dommages physiques et le système productif dans son ensemble. Cet angle nécessite davantage de données et d'hypothèses que le précédent. Dans ce cas-là, il est également nécessaire de recourir à une fonction de dommage, mais elle doit être plus sophistiquée,

par exemple en étant désagrégée sur les plans géographique et sectoriel. Plusieurs approches sont envisageables avec notamment des hypothèses sur des températures ou précipitations. Par ailleurs, les régulateurs, notamment la Banque centrale européenne dans le cadre des stress tests climatiques imposés au secteur financier, communiquent des scénarios incluant des catastrophes climatiques (sécheresses, crues...) à des banques pour qu'elles appréhendent leurs risques physiques. On peut aussi mentionner le célèbre modèle d'évaluation intégré baptisé DICE (*Dynamique Integrated Model of Climate*), développé par William Nordhaus, prix Nobel d'économie 2018. Celui-ci est un modèle pluridisciplinaire reliant de nombreux facteurs qui agissent sur la croissance économique, les émissions de CO₂, le cycle du carbone, le changement climatique, les dommages climatiques et les politiques climatiques. Une variante de DICE est le modèle RICE (*Regional Integrated model of Climate and the Economy*). Enfin, le modèle *Climate value-at-risk* mesure la perte espérée sur des actifs dans des cas extrêmes. Le lecteur peut notamment se référer à cette publication de l'ILB sur le sujet des scénarios et des modèles économie-climat : 



> **Le risque de transition** se définit comme l'ensemble des sous-risques liés à l'adaptation des économies vers une trajectoire bas-carbone. Il regroupe donc toutes les conséquences économiques à long terme relatives à l'instauration de nouvelles règles environnementales pour mettre en place un modèle économique bas-carbone. Dès lors, les projections financières sont difficiles à réaliser et dépendent d'hypothèses et de variables particulièrement incertaines et éloignées.



Les problématiques spécifiques au risque de transition

Suivant la définition du risque de transition, dont la complexité principale réside dans des incertitudes de long terme, l'établissement de projections financières ne peut pas s'effectuer avec les modèles traditionnels utilisés en finance (la théorie moderne du portefeuille de Markowitz, le MEDAF de Sharpe ou encore la formule de Black-Scholes-Merton). **De fait, les nombreuses variables et hypothèses sont majoritairement inconnues, car elles dépendent de problématiques non résolues.** Comment prévoir un prix du carbone dans 10, 20 ou 30 ans ? Les nouveaux investissements dans le pétrole et le gaz seront-ils des actifs échoués dans 15 ans, alors que leur durée de vie est largement supérieure (voir encadré ci-contre sur les actifs échoués) ? Quelles seront les futures normes pour les industries polluantes ? Quid des évolutions technologiques prometteuses ? Si ces interrogations ne sont pas exhaustives, **elles contiennent des incertitudes majeures non probabilisables rendant les exercices financiers prospectifs très difficiles à réaliser.**



Les actifs échoués, un concept antérieur aux risques climatiques

Les actifs échoués décrivent certaines situations dans lesquelles le financement et la conception d'unités énergétiques ne sont pas viables sur le plan du retour sur investissement. Cette expression est apparue à la fin des années 1980 avant les préoccupations sur le climat, et de fait, des actifs échoués apparaissent tous les jours, par le biais de la destruction créatrice. **Sur le plan climatique, certains évènements localisés peuvent générer des dégâts importants sur des actifs.**

Par ailleurs, il est certain que des pertes se produiront en fonction des politiques climatiques mises en place. **Dans la sphère réelle par exemple, les centrales à charbon sont vouées à devenir des actifs échoués à terme.** De même pour les investissements dans les hydrocarbures aujourd'hui, réalisés par les grandes majors du secteur, alors qu'ils ne sont pas compatibles avec la trajectoire de l'Accord de Paris, et que **le pic de demande en combustibles fossiles doit être atteint en 2030 si l'on s'en tient à un scénario ambitieux de transition.**

Du côté de la sphère financière, les actifs échoués représentent tous les prêts et titres de dettes accordés au secteur des hydrocarbures. Néanmoins, il y a un effet ambigu des actifs échoués dans les hydrocarbures, car il n'est pas si clair que **le lien entre l'actif échoué sur le plan physique et celui sur le plan financier soit établi.** Ce secteur doit certainement représenter une fraction faible des portefeuilles de prêts totaux. Par ailleurs, **les grandes majors pétrolières pourraient aussi devenir des agents de la transition en raison de leurs niveaux abondants de trésorerie.** Il faut également mentionner la question de la soutenabilité des actifs échoués dans les pays souverains qui dépendent des hydrocarbures sur le plan économique et budgétaire.

Enfin, les actifs échoués dans d'autres industries (par exemple pétrochimique) ne doivent pas être négligés, car les transformations à l'œuvre dans les autres secteurs industriels sont sous-évaluées et dépendent de la rapidité d'adaptation. Le scope des actifs échoués est très large.

Les superviseurs se penchent de plus en plus sur le risque de transition

Malgré les problématiques liées au risque de transition mentionnées précédemment, plusieurs superviseurs au niveau européen (en particulier la Banque centrale européenne (BCE), l'Autorité bancaire européenne, l'Autorité européenne des marchés financiers, l'Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles) ou en France, l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR) et la Banque de France, se sont emparés de la question des risques climatiques dont celui de transition. Ainsi, ces dernières années, **plusieurs exercices prudentiels ont été effectués comme des stress tests climatiques**, notamment par la BCE et la Banque de France. Ceux-ci se sont basés notamment sur les différents scénarios de transition élaborés par le NGFS (*Network for Greening the Financial System*), qui est un réseau regroupant des banques centrales et des superviseurs pour le verdissement du système financier. Cependant, si ces travaux sont importants et permettent d'impulser une dynamique primordiale pour comprendre et évaluer les risques climatiques, ils comportent également des limites. Premièrement, les scénarios établis par le NGFS (voir encadré ci-contre) - qui servent de références dans la communauté académique et le secteur financier - ont peu de variantes. Deuxièmement, dans les exercices prudentiels (stress tests) des régulateurs, le secteur financier est un module externe sans interdépendance avec les autres secteurs, ce qui contraint à prendre en compte de nombreuses hypothèses. Troisièmement, le risque de transition doit être modélisé à tous les secteurs et les actifs, car ils seront tous concernés par ce risque. Or, pour l'heure, **seul les secteurs liés aux énergies fossiles ont fait l'objet d'études et d'analyses spécifiques**. Pour parvenir à une modélisation plus large du risque de transition, plusieurs approches peuvent être mobilisées : **les dérivés de modèles classiques input/output, les modèles en réseaux de production ou encore des modèles à agents multiples comprenant des hypothèses de comportement et une structure stock-flux cohérente (SFC) pour y incorporer le secteur financier**.

Les scénarios de référence du NGFS

Le NGFS, à l'aide de climatologues et d'économistes, a établi une série de scénarios hypothétiques pour comprendre comment le changement climatique (risque physique) et les tendances en matière de politique et de technologie climatiques (risque de transition) pourraient évoluer dans différents futurs. Il y a ainsi quatre grandes classes de scénarios, d'après le site web du NGFS :

- **Les scénarios dit « ordonnés »** supposent que les politiques climatiques sont introduites rapidement et deviennent progressivement plus strictes. Les risques physiques et de transition sont relativement faibles. Dans cette catégorie, on retrouve notamment un scénario Net Zero en 2050, un scénario de réchauffement inférieur à 2 degrés ou encore un scénario où la demande est faible.
- **Les scénarios désordonnés** explorent des risques de transition plus élevés en raison de politiques retardées ou divergentes entre les pays et les secteurs. Les prix du carbone sont généralement plus élevés pour une température donnée. L'un des principaux scénarios impliquent une transition retardée.
- **Les scénarios de la serre chaude** supposent que des politiques climatiques sont mises en œuvre dans certaines juridictions, mais que les efforts mondiaux sont insuffisants pour enrayer un réchauffement significatif de la planète. Les seuils de température critiques sont dépassés, ce qui entraîne des risques physiques graves et des effets irréversibles tels que l'élévation du niveau de la mer.
- **Les scénarios « trop peu, trop tard »** reflètent des retards et des divergences internationales dans l'ambition des politiques climatiques qui impliquent des risques de transition accrus dans certains pays et des risques physiques élevés dans tous les pays en raison de l'inefficacité globale de la transition.





La recherche académique doit se poursuivre

Outre les régulateurs, la recherche académique tente d'avancer sur **la modélisation du risque de transition, qui est très complexe pour les raisons évoquées précédemment**. La principale question de recherche étudiée est la suivante : **la transition bas-carbone peut-elle créer une crise financière ?** Nos travaux dans ce champ, dans le cadre de la thèse intitulée *Un bilan financier des trajectoires du GIEC : Évaluer les propriétés de stabilité financière des trajectoires canoniques d'atténuation*, menée au Cired et soutenue fin 2023, ont en effet déjà fait l'objet de plusieurs articles de recherche, publiés ou présentés, comme *Decarbonisation and financial instability in a stock-flow consistent model* et *Transition risks, asset stranding and financial instability*. Dans ces deux articles, nous nous intéressons aux risques financiers liés à la transition bas-carbone comme les actifs échoués, les risques de marché et de liquidité ou encore l'instabilité financière.

Des résultats préliminaires riches d'enseignement

Nos travaux de recherche s'appuient sur une modélisation dite stock-flux cohérente (SFC), qui provient de l'école postkeynésienne. Cette approche permet ainsi **d'imbriquer l'économie réelle et le système financier dès le départ**. Dans le modèle proposé, nous retrouvons des entreprises carbonées et non carbonées, la fixation d'une trajectoire d'émissions (correspondant au rythme de baisse des émissions) et une politique climatique (prix du carbone). Ensuite, plusieurs indicateurs sur la stabilité financière sont mesurés, comme **les probabilités de défaut, les corrections des prix des actifs ou encore les pertes encourues en cas de défaut d'une contrepartie** (*loan given default* en anglais).

Les principaux résultats sont les suivants :

- > **Le prix du carbone et la forme précise de la trajectoire de décarbonation** sont les principaux facteurs du risque de transition.
- > **L'intégration des effets d'amplification (accélérateur financier) d'un choc** - par lequel le secteur financier va exacerber des chocs initiaux par des contagions au sein du système financier et par des effets retours sur l'économie réelle - entraîne des répercussions modérées sur les profils de transition.
- > **Les banques ont la capacité d'absorber la transition, même avec un prix élevé du carbone, et malgré quelques fragilités à court terme.** En revanche, les agents non bancaires (investisseurs institutionnels : assureurs, gestionnaires d'actifs etc.), par le biais des prix des actifs et des corrections des marchés, sont fragilisés avec des pertes importantes, surtout si les prix du carbone sont élevés. Ce résultat préliminaire peut s'expliquer par le fait que les risques de crédit sont plus faibles que ceux sur les actifs. Les chocs sont généralement plus forts sur les marchés financiers, tandis que les banques ont des portefeuilles de prêts davantage diversifiés.
- > **Le modèle plaide pour une trajectoire de décarbonation dans laquelle les efforts de décarbonation de court terme sont plus limités pour s'accélérer sur le long terme.** Cela permet de limiter les risques à court terme, car le rythme de décarbonation est un paramètre important.



Des questions de recherche encore à creuser par la communauté académique

Un certain nombre de questions de recherche sur le risque climatique de transition restent en suspens et sont particulièrement difficiles à résoudre. Dans une revue de la littérature existante sur le risque climatique et son impact sur la stabilité financière (voir *Financial stability, stranded assets and the low-carbon transition - A critical review of the theoretical and applied literatures*, p14 dans la partie « Pour aller plus loin »), plusieurs avancées sont identifiées, mais aussi des écueils persistants.

Parmi les résultats nouveaux, il apparaît que **la transition vers une économie bas-carbone impliquera des transformations profondes des systèmes énergétiques et économiques**, qui peuvent entraîner des conséquences néfastes sur la stabilité financière. La littérature sur le risque de transition financière a ainsi montré que la conjonction de la politique climatique, des changements technologiques et des modes de consommation, peuvent se propager aux marchés financiers par le biais de nombreux canaux de transmission (correction des prix des actifs, fragilité des entreprises carbonées, hausse des indemnités assurantielles, par exemple). Dans les cas extrêmes, d'après Mark Carney, dans son célèbre discours sur la tragédie des horizons de 2015, lorsqu'il était gouverneur de la Banque d'Angleterre, cette dynamique peut même **aboutir à des crises systémiques en provoquant un moment « Minsky »**. Celui-ci est un phénomène durant lequel les investisseurs sont contraints de vendre leurs actifs précipitamment pour obtenir des liquidités, déclenchant une spirale baissière sur les prix et un assèchement de la liquidité.

Du côté des questions à approfondir sur le risque de transition, il faut pointer la **multitude de méthodes et approches développées actuellement, rendant difficile la comparaison des résultats**. En d'autres termes, il manque un cadre commun pour étudier le risque de transition. Par ailleurs, les différents travaux de recherche récents se basent sur un nombre de scénarios restreints, qui mériteraient d'être élargis en termes de rythme de décarbonation, de profils de prix du carbone ou encore à des hypothèses géopolitiques ou autres, surtout ceux qui portent sur le long terme. À titre de comparaison, les rapports du GIEC se basent sur un ensemble de plus de 600 scénarios de transition et variantes pour étudier les coûts de la transition, les évolutions du système énergétique etc. D'autres limites ont été également observées en ce qui concerne le secteur financier. Une partie des travaux sur le risque de transition ne modélisent pas le secteur financier en tant que tel, mais **utilisent des modules externes afin de calculer des indicateurs pertinents pour la stabilité financière**, comme les ratios de capitaux réglementaires des banques et assureurs, les expositions aux risques et la diversification des portefeuilles ou encore la présence de déséquilibres et de bulles spéculatives.





Aussi, ils ne prennent pas en compte les interactions entre le système financier et l'économie réelle, de sorte qu'il manque les effets en retour du secteur financier (en cas de crise ou d'instabilité par exemple) sur l'économie réelle dans des scénarios de long terme. **Les impacts de la stabilité financière sur l'économie réelle ne sont pas estimés. Il apparaît donc crucial d'apporter des éléments de modélisation du secteur financier**, à savoir l'évolution des bilans et l'exposition des agents financiers au risque de transition¹, les interactions entre agents financiers, avec des possibles amplifications de chocs initiaux pouvant exacerber des dynamiques d'instabilité au sein du système financier et leurs effets-retour sur l'économie productive. Dans ce contexte, **la littérature académique sur les réseaux financiers, ou les récents travaux utilisant des méthodologies intégrant le secteur financier et l'économie réelle, comme l'approche stock-flux cohérente, sont des pistes sérieuses.** Enfin, sans rentrer dans des détails exhaustifs, **d'autres champs des changements climatiques** - et pas uniquement le réchauffement climatique - **doivent être étudiés et inclus dans la transition bas-carbone comme la perte de biodiversité, la pollution ambiante, la déforestation ou encore l'acidification des océans.**

De nouvelles méthodes à développer et à renforcer

Pour tenter d'évaluer le risque de transition climatique, le recours à de nombreuses hypothèses sur l'évolution de l'économie au cours du temps est nécessaire. Or, celles-ci comportent de nombreuses incertitudes, qui rendent les modélisations très complexes, y compris les modèles d'évaluation intégrés (IAM) utilisés par le GIEC et servant de base pour mesurer le risque de transition (voir notamment le modèle DICE mentionné dans l'encadré p.5). De fait, **il est difficile de probabiliser, par exemple, la trajectoire des progrès techniques, les niveaux de croissance, le degré de coopération internationale etc.** Pour répondre à ces difficultés, **le GIEC a développé un cadre analytique comprenant cinq narratifs socio-économiques** dit SSP (*Shared Socio-economic Pathways*) comprenant de nombreuses hypothèses sur le développement de technologies bas-carbone, les taux de croissance futurs, la coordination des pays...

¹ Aujourd'hui, les études avec « bilan dynamique » se reposent majoritairement sur des échanges entre banques régulées et institutions de régulation, ce qui pose d'évidents problèmes d'aléa moral.

D'ailleurs, les scénarios du NGFS ont pour hypothèses sous-jacentes celles incluses dans le SSP2 du GIEC dite « La voie médiane », qui est une projection du *business as usual* contrairement aux quatre autres narratifs ayant des hypothèses plus fortes sur le futur des sociétés humaines (par exemple SSP1 considère que les technologies vertes vont se développer plus ou moins de manière autonome).

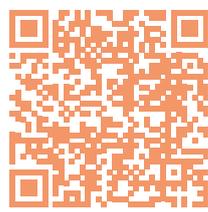
Autre élément, **le risque de transition est mondial et concerne tous les secteurs économiques. Il faut donc recourir à des méthodes de désagrégation géographiques et sectorielles, car elles permettent de capturer les interactions entre les différentes régions du globe, ainsi qu'entre les différents secteurs économiques.** Bien évidemment, parmi ces derniers, les plus touchés seront ceux des énergies fossiles et des industries très carbonées (sidérurgie, ciment...), mais comment les autres seront-ils impactés et par quelle ampleur ? En clair, la désagrégation géographique et sectorielle permettrait d'**identifier les zones et secteurs affectés par la transition, ainsi que les éventuels bénéficiaires.** Dans l'idéal, la désagrégation sectorielle et géographique devrait être reliée avec le secteur financier, sans que ce dernier soit une composante externe de la modélisation du risque de transition. Les raisons ? Les agents financiers sont très hétérogènes entre eux en matière de taille et d'exposition aux risques. En outre, **les effets de réseau (c'est-à-dire les interconnexions) et l'amplification d'un choc subi par un agent pouvant se répercuter aux autres sont plus forts que dans l'économie réelle.** Il faudrait aussi pouvoir séparer les classes d'actifs entre elles pour distinguer les participations au capital d'une entreprise, des obligations, des prêts et titres de dettes, qui n'ont pas le même degré d'exposition et donc de provisionnement en cas de perturbation majeure du système financier. Enfin, **les flux financiers internationaux doivent être également intégrés à la modélisation, car ils provoquent des effets transfrontaliers entre les différents pays.**

Rapprocher la finance de l'économie réelle

Comment relier davantage la finance et l'économie réelle, notamment l'impact des bilans bancaires à long terme sur les agrégats macroéconomiques ?

Cette question reste ouverte, mais quelques méthodologies peuvent apporter des éléments de réponse. Ainsi, pour contourner l'hypothèse courante selon laquelle les banques ont un bilan statique sur un horizon temporel de 30 ans (ce qui en pratique est évidemment impossible), **nos travaux recourent à des analyses *bottom-up*** (du bas vers le haut ou ascendante, par exemple les régulateurs qui demandent aux entités régulées comment elles gèreraient une transition) auprès des banques, même si cela peut générer une problématique d'asymétrie

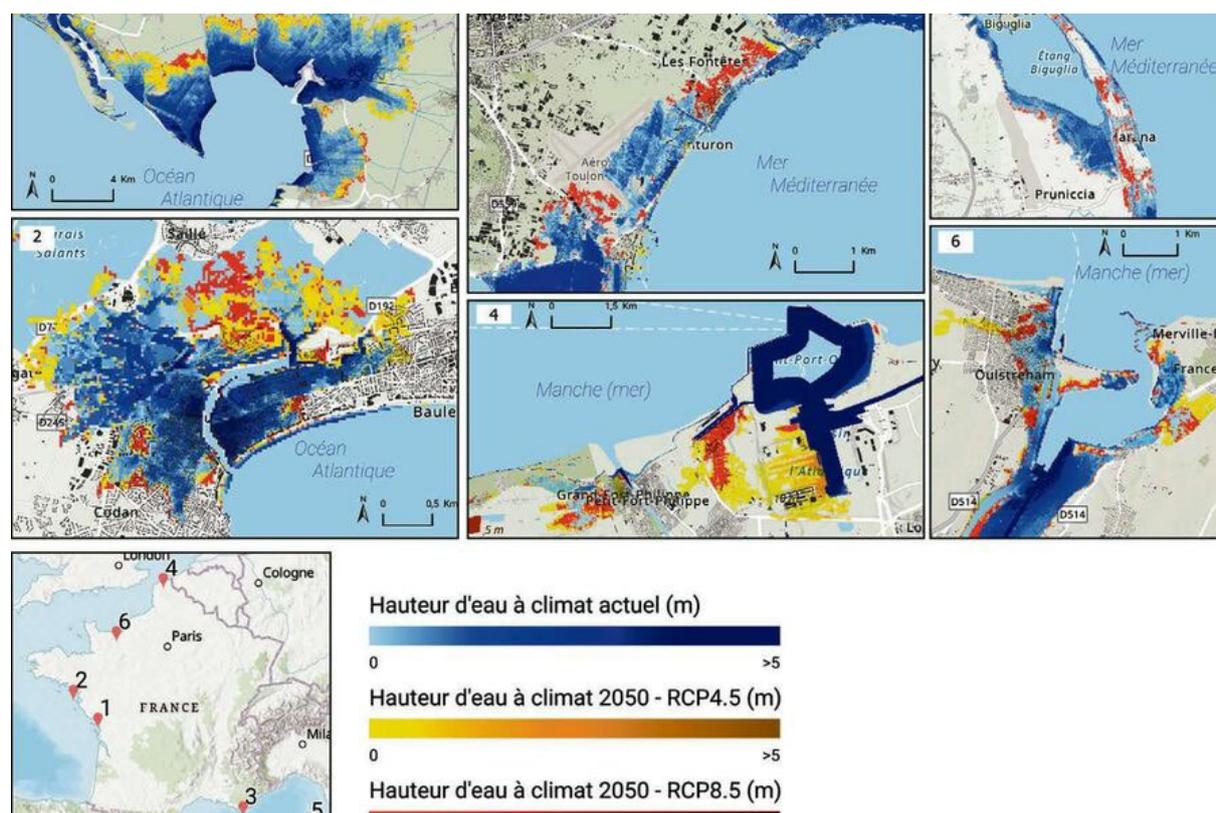


de l'information par laquelle les banques ont intérêt à ne pas trop tirer la sonnette d'alarme. (voir notamment la note :  

Autrement dit, en finance, il manque des travaux théoriques sur les aspects dynamiques des bilans et leurs liens avec la transformation des systèmes économiques. Dans ces conditions, les modèles à agents basés - qui modélisent des populations interagissant entre elles - peuvent constituer une piste de recherche intéressante, car ils permettent de modéliser des interactions possiblement fines entre différents profils d'agents.

Événements naturels : la modélisation au défi du changement climatique

Le récent rapport Langrenoy a mis en lumière les limites de la modélisation climatique chez les assureurs. Mais les événements météorologiques exceptionnels font du développement de modèles en interne un enjeu stratégique.



Exemple de modélisation réalisée par CCR afin de mieux anticiper les sinistres liés aux événements climatiques.

La mission Langrenoy n'a pas fini de faire parler d'elle. Remis le 2 avril aux ministres de la Transition écologique et de l'Économie et des Finances, son rapport sur l'assurabilité des risques climatiques livre un diagnostic très critique sur les capacités des assureurs français en matière de modélisation climatique. « *Les investissements sont très variables selon les acteurs, la réassurance, publique notamment, restant l'utilisatrice la plus avancée de modèles de bonne qualité*, indiquent les auteurs. *Aujourd'hui, les outils de modélisation ne considèrent l'adaptation que de manière très simplifiée, au mieux* », peut-on lire.

Selon les membres de la mission, la plupart des représentants de la profession auditionnés ont admis se reposer entièrement sur les estimations fournies par la Caisse centrale de réassurance (CCR) pour les périls relevant du régime d'indemnisation des catastrophes naturelles. « *Une minorité d'entreprises d'assurances a commencé à investir dans la modélisation de certains périls, inondation, retrait-gonflement des sols argileux (RGA), pour en affiner certaines*

dimensions », notamment l'identification des zones à plus forte exposition aux aléas et les cumuls de capitaux assurés correspondants, complète le rapport.

Depuis bientôt vingt ans, CCR collecte la quasi-totalité des données de la sinistralité française pour transmettre aux cédantes des estimations de pertes toujours plus précises, élaborées à partir de ses quatre grands modèles : la sécheresse, l'inondation, le cyclone et le séisme. Sa maîtrise technique acquise auprès de partenaires scientifiques de longue date, notamment Météo France, et sa capacité de calcul inégalée en France inciteraient les assureurs à délaissier tout simplement la modélisation des périls couverts par le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles. Hors du périmètre du régime cat'nat', seule la tempête serait bien maîtrisée par la profession et les spécialistes mondiaux de la modélisation, comme RMS ou AIR, selon le rapport Langreny.

Démarche proactive

Il en va autrement de périls désignés il y a quelques années encore comme « secondaires » : la grêle et la sécheresse. La mission souligne ainsi « l'inconsistance » de l'estimation de la période de retour d'un épisode de grêle comme celui de juin 2022, allant, selon les assureurs, de 10 à 200 ans, ou pour la sécheresse de l'été 2022, de 15 à 100 ans... « *La violence d'événements majeurs, comme la grêle de 2022, nous a tous surpris, y compris les réassureurs qui ont une vision mondiale de ce type de risques* », admet Delphine Létendart, directrice assurances de Groupama. « *Les événements de grêle de 2022 en France et de 2023 en Italie ont rebattu les cartes*, confirme Simon Blaquièrre, directeur de la réassurance chez Generali et du Generali Climate Lab. *La grêle est un péril très complexe et mal modélisé par l'ensemble du marché.* »

Le secteur semble avoir été rattrapé par le changement climatique. « *En 2015, lors de la Cop21, l'objectif était de limiter la hausse des températures à 2°C en 2100*, rappelle Charles Dumartinet, directeur actuariat et modélisation de CCR. *En 2024, nous sommes déjà presque à 1,7°C. Entre la prise de conscience et la mise en ordre de marche, il y a le temps incompressible de la montée en compétences.* »

Pour autant, la profession estime avoir été proactive. « *Cela fait plus de neuf ans que le Generali Climate Lab travaille sur la modélisation des risques climatiques*, rappelle Simon Blaquièrre. *Nous avons des partenariats de recherche de haut niveau et finançons des thèses sur les risques tempête, sécheresse et grêle.* » Pour les grands groupes d'assurance, comme Covéa, Axa et Generali, le développement de modèles en interne est déjà un enjeu stratégique. « *Contrairement aux modèles de marché mis à disposition par les agences de modélisation ou les courtiers, développer un modèle interne permet de maîtriser les paramètres d'une modélisation, d'en apprécier les limites et de s'assurer que le calibrage du modèle est en phase avec sa vision et son appétence pour le risque* », explique Charles Dumartinet.

Assurance récolte : le prix de la non-modélisation

Selon le rapport de la mission Langreny, les acteurs de l'assurance récolte attribuent leurs pertes depuis 2005 aux conséquences du changement climatique, mais aussi aux insuffisances des modélisations climatiques. « *C'est pour cette raison que Groupama s'est très tôt mobilisé pour mettre en place un groupement de coréassurance, chargé de partager les données*, confirme Delphine Létendart, directrice assurances de Groupama. *Il s'agit d'améliorer la connaissance de ce risque, qui est uniquement climatique.* » Prévu dans le cadre de la réforme de l'assurance récolte par la loi d'orientation du 2 mars 2022, le *pool* de coréassurance divise la profession, et n'a pas encore vu le jour.

Le secteur est par ailleurs invité par ses régulateurs à évaluer ses risques par la modélisation, que ce soit lors du récent *stress test* climatique de l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR), ou dans le cadre des rapports Orsa (*Own risk and solvency assessment*), de l'Eiopa, Autorité européenne des assurances. Des initiatives de place ont vu le jour. « *À la fin de l'année dernière, la Mission des risques naturels (MRN) a produit une nouvelle cartographie de la grêle*, détaille Pierre Lacoste, directeur réassurance de Groupama et président de la mission risques naturels de France Assureurs. *La dernière remontait à 1999.* » Mais sur le front de la réassurance aussi, le réveil a été brutal. « *Le désengagement des réassureurs et l'augmentation des rétentions sur certains risques ont sensibilisé les assureurs, qui doivent encore mieux évaluer les risques souscrits* », signale Pierre Lacoste.

De nouveaux acteurs sont apparus sur les marchés de la modélisation qui n'étaient couverts ni par CCR, ni par les grandes agences de modélisation, ni par les courtiers. Mais on ne s'improvise pas modélisateur. « *La constitution d'une équipe pluridisciplinaire, sa montée en compétences, la construction d'un environnement technique et scientifique et d'un socle de données, ne sont qu'une première étape. L'expérience et la maturité sur les sujets de modélisation impliquent des retours d'expérience indispensables, dont la courbe d'apprentissage peut prendre une dizaine d'années* », estime Charles Dumartinet.

Intégrer les trajectoires du Giec

Le secteur se trouve confronté à un autre obstacle de taille : sa propre culture actuarielle. « *Nous avons l'habitude en actuariat de projeter l'avenir sur l'observation de la sinistralité passée*, explique Charles Dumartinet. *L'accélération du changement climatique modifie notre façon de travailler. Le climat passé n'est plus représentatif du climat futur. Il nous faut non seulement actualiser nos expositions, mais aussi redresser les courbes du passé en intégrant les trajectoires du Giec, pour tenir compte de l'impact du changement climatique.* » La marge de progrès reste donc importante. « *L'enjeu réside dans notre capacité à intégrer de nouvelles données et à enrichir les modèles existants*, précise Delphine Létendart. *C'est un sujet de rapidité, de précision et de sophistication.* »

Mais les assureurs pourraient rapidement trouver les ressources, pour combler leur retard. « *Si, pour réduire leurs foyers de perte, certains assureurs s'autorisent une liberté de sélection plus ou moins déclarée, l'investissement dans un outil de modélisation à maille géographique fine s'avère rentable* », regrettent les membres de la mission Langreny.

Géraldine DAUVERGNE