

Stress-tests climatiques par scénarios : De l'analyse des risques à la modélisation

Document de travail



EXPERTISES

Février
2021

REMERCIEMENTS

Cette étude est réalisée dans le cadre du projet Finance ClimAct. Ce projet bénéficie d'un financement de la Commission européenne (LIFE Integrated Projects) sur la période 2019-2024. Il est coordonné par l'Agence de la Transition Ecologique (ADEME) et comprend le Ministère de la Transition Ecologique, l'Autorité des marchés financiers, l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution, 2^e Investing Initiative, l'Institut de l'Economie pour le Climat, Finance for Tomorrow et GreenFlex.

Finance ClimAct contribue à la mise en œuvre de la Stratégie Nationale Bas Carbone de la France et du Plan d'action finance durable de l'Union Européenne. Il vise à développer les outils, méthodes et connaissances nouvelles permettant (1) aux épargnants d'intégrer les objectifs environnementaux dans leurs choix de placements, (2) aux institutions financières et à leurs superviseurs d'intégrer les questions climatiques dans leurs processus de décision et d'aligner les flux financiers sur les objectifs énergie-climat et (3) aux industriels de favoriser l'investissement dans l'efficacité énergétique et l'économie bas-carbone.

La mise en place, le suivi de l'étude ainsi que la relecture ont impliqué :

Gaël Callonnec (ADEME)
Guilain Cals (ADEME)
Mathieu Garnero (ADEME)
Valérie Quiniou (ADEME)

CITATION DE CE RAPPORT

Florian JACQUETIN. 2021. Stress-tests climatiques par scénarios: de l'analyse des risques à la modélisation. 68 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne www.ademe.fr/mediatheque

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Projet de recherche coordonné par : Florian Jacquetin
Direction / Service : Dir. Exécutive Prospective et Recherche

SOMMAIRE

RÉSUMÉ.....	4
1. INTRODUCTION ET CONTEXTE.....	5
2. IDENTIFICATION DES RISQUES ET DES VULNERABILITES CLIMATIQUES DES PORTEFEUILLES	7
2.1. Une lecture des risques climatiques parmi les risques financiers.....	7
2.2. Quels sont les risques de transition ?.....	10
2.3. Quels sont les risques physiques ?.....	13
2.4. Evaluer les risques climatiques des contreparties des institutions financières.....	15
2.5. Confronter les risques climatiques aux expositions sectorielles et géographiques des institutions financières.....	20
3. DEFINITION D'UN SCENARIO DE STRESS-TEST CLIMATIQUE.....	26
3.1. Une vision prospective du climat, de la société et de l'économie par le GIEC.....	26
3.2. Les méthodes narratives pour développer des scénarios climatiques.....	27
3.3. Les scénarios climatiques des institutions internationales et leurs limites.....	28
3.4. Comment élaborer des scénarios de stress-test sur le risque de transition ?	32
3.5. Comment élaborer des scénarios de stress-test sur le risque physique ?.....	35
4. MODELISATION MACROECONOMIQUE D'UN STRESS-TEST CLIMATIQUE.....	37
4.1. Apport d'un modèle macroéconomique	37
4.2. Classes de modèles mobilisables	37
4.3. Propriétés d'un modèle appliqué au risque de transition.....	41
4.4. Transition énergétique et risques de modèle	44
4.5. L'apport de la modélisation IAM évaluer les risques physiques	46
5. CONCLUSION	47
ANNEXE 1 : VUE D'ENSEMBLE DES DIFFERENTS SCENARIOS SOCIO-ECONOMIQUES REALISES PAR LES INSTITUTIONS INTERNATIONALES .	49
ANNEXE 2 : LES SCENARIOS PROSPECTIFS FRANÇAIS.....	57
ANNEXE 3 : LE MODELE THREE-ME	58
ANNEXE 4 : RECENSEMENT DES CONSEQUENCES ECONOMIQUES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN FRANCE	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	64
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	67
SIGLES ET ACRONYMES	68

RÉSUMÉ

Ce document de travail présente une revue de l'art sur la réalisation de tests de résistance climatiques par les banques centrales, superviseurs et institutions internationales et sur la modélisation macroéconomique des scénarios climatiques qu'ils nécessitent. Ces outils de gestion du risque, utilisés couramment par les institutions financières pour mesurer leur résilience à la matérialisation d'un risque économique et financier à court terme, nécessitent des adaptations structurelles pour être étendus aux risques climatiques, qu'il s'agisse de risques physiques, de transition ou de responsabilité. Des enjeux spécifiques doivent être considérés : horizon de temps potentiellement très longs, granularité fine des scénarios pour tenir compte des nombreuses spécificités internationales et sectorielles, incertitude radicale et amplitude extrême des risques, interdépendance des risques physiques et de transition.

La construction des scénarios climatiques par les superviseurs repose sur un grand nombre de choix et d'hypothèses : méthodes narratives choisies (historique, hypothétique, énumérative ou prospective), leviers de transition (instruments de politique environnementale, changements technologiques, marchés) et trajectoires socio-économiques et climatiques (scénarios SSP et RCP du GIEC par exemple). Face à cette large gamme de choix, le risque encouru sera fortement conditionné par le choix des scénarios et de l'horizon de l'exercice. Par ailleurs, en l'absence de référence historique sur l'effet de ces risques sur l'économie, le choix du modèle a également une influence significative sur les résultats, en particulier selon sa catégorie (IAM, CGE, modèles macro-économétriques), ses propriétés (keynésiennes ou walrasiennes), sa représentation de l'économie (désagrégation sectorielle, besoins en énergies) et du choix de redistribution des revenus de la fiscalité carbone. Enfin, la représentation des effets de la transition à un niveau suffisamment fin fait par ailleurs émerger des opportunités et des stratégies d'investissement gagnantes, ce qui est également un élément nouveau pour un test de résistance.

Compte-tenu de la marche à gravir pour bâtir des tests de résistance climatiques et face à la multiplicité des hypothèses et choix méthodologiques, les travaux portés par l'ADEME ont pour objectif de faire des propositions et préconisations en s'appuyant sur l'expertise macroéconomique, prospective et sectorielle de l'agence. Cette note qui présente notre vision de l'état de l'art et des enjeux sur le sujet des tests de résistance climatiques est la première étape de cette démarche.

1. Introduction et contexte

La matérialisation des risques climatiques sur les portefeuilles financiers devient plus sensible et fait l'objet d'une attention assidue par les superviseurs et régulateurs financiers. La « tragédie des horizons »¹, théorisée en 2015 par le gouverneur de la Banque d'Angleterre Mark Carney (Carney, 2015), décrit la matérialisation des risques liés au changement climatique² sur les portefeuilles financiers. C'est à ce titre que les superviseurs et banques centrales développent de nouveaux modèles permettant de réaliser des scénarios intégrant les effets du changement climatiques et permettant de mener à bien leurs missions statutaires compte tenu de cette nouvelle variable.

En particulier se pose la question de l'intégration de ces nouveaux modèles aux exercices de stress-tests, exercices périodiques visant à assurer la résilience individuelle des institutions ainsi que prévenir les risques systémiques. C'est pourquoi les autorités publiques définissent les premiers contours d'une future réglementation financière, ouvrant notamment la voie à l'intégration des risques climatiques dans les exercices menés par les autorités européennes (ABE, BCE) :

- Recommandation de l'*European Systemic Risk Board*³ d'inclure un scénario de transition dans les exercices de stress-tests en 2016 (ESRB, 2016);
- Création de la *Task Force on Climate-Related Financial Disclosures*⁴ en 2015 et recommandation de généraliser les stress-tests climatiques (TCFD, 2017);
- Création du NGFS (*Network for Greening the Financial System*⁵) en 2017, réseau regroupant des banques centrales des cinq continents et organisant notamment un groupe de travail sur « les aspects macrofinanciers et l'impact des risques liés au climat sur la stabilité financières », suivie de la publication d'un premier guide méthodologique et d'un ensemble de scénarios exploratoires à usage des superviseurs (NGFS, 2020).

Enfin, plusieurs banques centrales nationales réalisent des exercices exploratoires de scénarios macroéconomiques et financiers intégrant les risques liés au changement climatique : Banque des Pays-Bas (Vermeulen, et al., 2018), Département californien des assurances en 2019 (2DII, 2019), Banque d'Angleterre (Bank of England, 2019), Banque du Canada (Ens & Johnston, 2020) et Banque de France (Allen, et al., 2020). Ces exercices, qui n'imposent aux institutions ni exigence en capital ni modèles internes spécifiques, visent à mesurer l'exposition et la résilience des institutions aux risques climatiques et posent ainsi les premiers jalons d'une méthodologie et d'outils communs à la réalisation future de « stress-tests climatiques ». Toutefois, leur définition reste sujette à discussion et leur articulation avec les exercices de stress-tests usuels n'est pas évidente, au regard des spécificités des risques climatiques et en particulier de leur incertitude et de leur matérialisation à des horizons de temps lointains.

Il existe en premier lieu un flou méthodologique concernant la définition-même d'un stress-test climatique : ceux-ci ne font encore l'objet d'aucune réglementation et peu nombreux sont les acteurs à se revendiquer d'avoir réalisé un tel exercice. Si la réglementation encadrant les stress-tests classiques peut servir de point d'appui à un premier référentiel, ses outils apparaissent encore limités pour évaluer les risques climatiques identifiés par les superviseurs en fonction des expositions spécifiques du portefeuille.

En vue du partage d'expériences et de la recherche d'un référentiel commun entre tous les acteurs (superviseurs, banques centrales, agences environnementales, institutions financières, milieu académique), ce document propose un ensemble minimal de normes, à la fois au regard de la réglementation existante pour les exercices usuels, du cadre méthodologique d'analyse par scénarios défini par le NGFS, des premiers exercices climatiques exploratoires menés par les institutions mais aussi au regard de la littérature académique et des attentes des différents acteurs, de ce que pourrait être (et

¹ Selon cette théorie, les acteurs n'auraient pas d'incitation à agir contre le changement climatique, étant donnés les contraintes de court terme liées au cycle des affaires, au cycle politique et aux horizons d'action des autorités publiques.

² Risques physiques, risques de transition, risques de responsabilité.

³ Conseil Européen du Risque Systémique.

⁴ Groupe de travail sur les informations financières liées au climat.

⁵ Réseau des banques centrales et superviseurs pour le verdissement du système financier.

devrait être) un stress-test climatique. Il s'intéresse notamment à la formalisation de scénarios de stress-test climatiques, articulés autour de trois axes :

- (i) L'analyse des risques financiers liés au climat et la définition de plusieurs indicateurs normatifs et statistiques pertinents, préalables à la mise en œuvre d'un stress-test pour assurer sa pertinence et la prise en compte de toutes les vulnérabilités identifiées ;
- (ii) Le recours et les limites de l'analyse par scénarios climatiques à travers plusieurs possibilités de narratifs, s'appuyant le cas échéant sur des projections de long termes académiques ;
- (iii) L'apport de la modélisation macroéconomique, notamment pour décliner finement des scénarios de transition aux niveaux granulaires pertinents pour leur utilisation par les institutions financières et permettant d'observer les gagnants et perdants de la transition.

2. Identification des risques et des vulnérabilités climatiques des portefeuilles

2.1. Une lecture des risques climatiques parmi les risques financiers

Afin d'aboutir à des normes et des bonnes pratiques encadrant les « stress-tests climatiques » (qui ne sont à ce jour définis par aucun texte), il peut convenir de se reporter à la réglementation et aux standards existants autour des stress-tests classiques. Apparus à la fin des années 1990, les tests de résistance (*stress-tests* en anglais) regroupent un ensemble d'outils de gestion des superviseurs et des établissements financiers destinés à évaluer la résilience d'une institution à un choc⁶ et l'adéquation du bilan de l'établissement aux exigences prudentielles (cf. **Encadré 1**). Plus précisément, ils doivent couvrir un ensemble de scénarios « sévères, mais plausibles », et s'assurer que cette sévérité reflète les risques spécifiques de l'établissement (EBA, 2018).

Le monde financier propose une typologie usuelle des risques financiers, qu'il convient de préciser au regard de la définition des risques climatiques proposée par Mark Carney (2015). Pour bien comprendre ce référentiel de risque, on peut définir trois niveaux successifs de matérialisation et de transmission du risque :

- 1^{er} niveau : l'élément déclencheur du risque ; le risque climatique tel qu'il a été défini par Mark Carney, peut se lire comme une source supplémentaire (ou identifiée de manière formelle) de perte financière car il précise une cause *en amont* des impacts financiers et est donc défini en fonction de l'élément déclencheur du *stress*, ce qui fait à la fois apparaître :
 - Les risques physiques, qui englobent les événements climatiques chroniques et extrêmes ;
 - Les risques de transition, qui sont liés au processus d'ajustement vers une économie bas-carbone ;
 - Les risques de litige, qui regroupent les risques financiers liés aux potentielles demandes de compensation des parties ayant souffert du changement climatique à des parties qu'elles tiendraient responsables.
- 2^{ème} niveau : sa transmission en effets économiques, essentiellement liés à des chocs sur des paramètres macroéconomiques pour des stress-tests classiques, ils incluent des canaux de transmissions à des niveaux plus fins (par exemple : hausse des coûts des intrants, disruption technologique, dommages sur du capital physique...).
- 3^{ème} niveau : son impact en risques financiers, à travers la typologie courante utilisée par les institutions financières (risque de crédit, de marché, opérationnel, de liquidité).

Selon la Banque centrale européenne (BCE), les risques climatiques sont potentiellement des facteurs de risque financiers à tous les niveaux usuellement considérés par les institutions (cf. **Tableau 1**). Il est à noter que les institutions sont déjà supposées se prémunir contre toutes formes de risques matériels, notamment dans le cadre du « Pilier 2 » (voir **Encadré 1**), ce qui inclut de fait et en théorie les risques climatiques. La Banque centrale européenne (2020) rappelle que celles-ci sont d'ores et déjà amenées à évaluer l'effet des risques climatiques sur leurs ratios de capital réglementaire sur un horizon d'un à trois ans, et sont « encouragées à adopter un horizon temporel élargi pour (ces) risques étant donné la probabilité qu'ils se matérialiseront principalement à moyen et long terme » et de les intégrer « à des tests de résistance sous une perspective économique ». Le cadre réglementaire de l'Autorité bancaire européenne (ABE) fait déjà référence au mandat du superviseur pour évaluer le « risque systémique potentiel lié à l'environnement » ; ce cadre est depuis renforcé par la directive CRD 5⁷ et le mandat pour

⁶ Celui-ci peut être de plusieurs natures, essentiellement de nature macroéconomique (un ralentissement économique) ou financier (faillite d'une contrepartie).

⁷ *Capital Requirements Directive*.

réaliser des « tests de résistance et des analyses de scénarios destinés à évaluer l'incidence des risques ESG dans le cadre de scénarios de gravité variable ».

Interrogés, les groupes bancaires français estiment couvrir les risques climatiques par les approches traditionnelles (ACPR, 2019). Toutefois, leurs approches sont pour l'instant centrées sur des horizons de court terme, et leurs outils internes ne sont pas spécifiquement tournés vers la matérialisation du risque climatique, que cela soit dans les exercices de stress-test ou les exercices de mesures quantitatives de risque. En particulier, ces dernières méthodes (incluant notamment la mesure de la *VaR*⁸), reposant sur des distributions de pertes empiriques et des intervalles de confiance, semblent moins adaptées à l'évaluation du risque climatique, qui se matérialise à travers des événements extrêmes et des discontinuités, pour l'essentiel encore non-observés historiquement.

Catégorie	Risque financier	Lien avec risque physique	Lien avec risque de transition
Risque de crédit/contrepartie	Risque qu'un emprunteur ne rembourse pas tout ou partie de son crédit aux échéances prévues	Valorisation des collatéraux dans les portefeuilles immobiliers, infrastructures	Hausse des coûts et baisse de la profitabilité de certaines activités liée à des signaux-prix
Risque de marché (taux, change, actions, matières premières)	Risque de perte qui peut résulter des fluctuations des prix des instruments financiers qui composent un portefeuille	Changement des attentes Volatilités et pertes liées à une revalorisation des actifs	Réévaluation rapide des actions et dettes des entreprises sur la base des cash-flow futurs anticipés (pertes, actifs échoués)
Risque opérationnel	Risque de pertes directes ou indirectes dues à une inadéquation ou à une défaillance des procédures de l'établissement	Perturbation liée aux dommages sur les immobilisations corporelles	Dégradation de la réputation Actions en justice
Risque de liquidité	Risque qu'une banque n'ait pas assez de liquidités pour répondre à ses engagements à court terme	Retrait de liquidité pour réparer les dommages physiques	Réévaluation des actifs liquides, affectant les coussins de liquidité

Tableau 1: Principales catégories de risques financiers, actifs et liens avec les risques climatiques

Source : à partir de European Central Bank (2020), *Guide on climate-related and environmental risks*.

⁸ La méthode de la *Value at Risk* (VaR) permet par exemple d'établir une distribution théorique de la valeur d'un portefeuille et d'établir une valeur minimale de pertes attendues à un niveau de confiance donné.

Encadré 1 : Les stress-tests comme outils de pilotage des risques financiers

Les stress-tests se sont particulièrement développés après la crise de 2008 et sont devenus des outils de gestion du risque courant, utilisés en parallèle ou en combinaison de méthodes quantitatives. Leur évolution suit le cadre de la réglementation prudentielle initiée par la Banque des règlements internationaux (BRI) et des « accords de Bâle » (banques) et des « normes Solvabilité » (assurances). Ces recommandations ont vu une transcription dans des directives communautaires puis dans le droit national (cf. **Figure 1**).

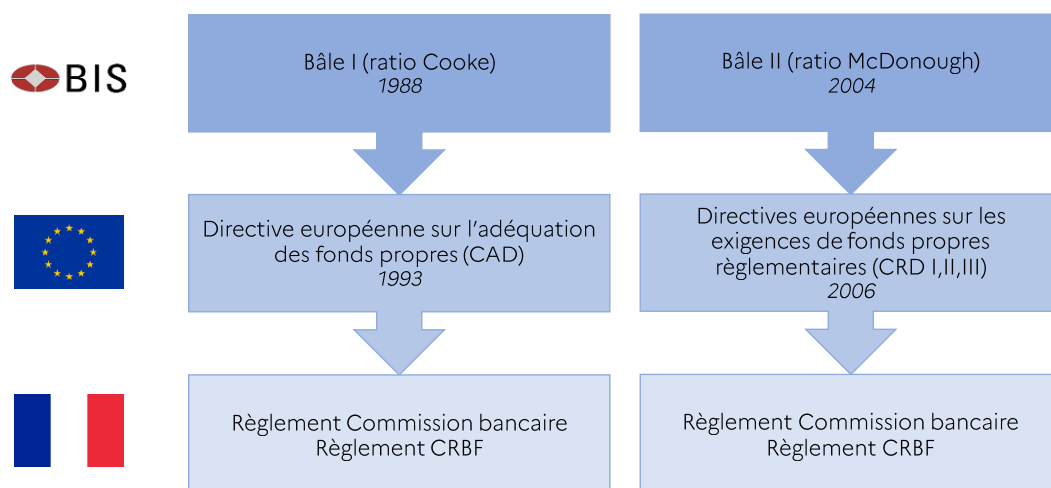


Figure 1 : Déclinaison de la réglementation prudentielle – exemples de Bâle I et Bâle II

C'est Bâle I qui introduit les principes réglementaires du ratio de solvabilité (à l'origine ratio « Cooke »). Les banques sont assujetties à une exigence minimale de 8 % de fonds propres par rapport à l'ensemble des crédits, pondérés en fonction du type de contrepartie. En 2004, Bâle II définit explicitement trois piliers réglementaires⁹, destinés à corriger les faiblesses de Bâle I et affiner la gestion du risque bancaire. Le Pilier I fixe une nouvelle exigence minimale de fonds propres (ratio « McDonough »), davantage en adéquation avec l'ensemble des risques financiers et pondère les calculs par le risque de défaut des contreparties. Il ouvre la voie à l'usage de modèles internes par les banques (« IRB¹⁰ approach »).

Enfin, le Pilier 2 organise la procédure de surveillance prudentielle, à travers l'analyse par la banque de l'ensemble de ses risques (y compris ceux déjà couverts par le pilier 1), le calcul de ses besoins de fonds propres au titre du capital économique et la confrontation par le contrôleur bancaire de sa propre analyse du profil de risque de la banque avec celle conduite par la banque elle-même. A cette fin, le superviseur établit des recommandations en vue d'adapter son action prudentielle, que ce soit via des fonds propres supérieurs aux exigences minimales ou toute autre technique appropriée.

Depuis 2008, une approche complémentaire des stress-tests dite « macroprudentielle », encouragée par Bâle 3, s'est développée afin de prévenir l'instabilité du système financier dans son ensemble. Les stress-tests contribuent alors à définir une politique macroprudentielle optimale à travers des outils de pilotage spécifiques (comme le coussin de fonds propres contra-cyclique).

Selon les standards de la Banque des règlements internationaux, un test de résistance doit être réalisé sur la base d'un processus d'identification des risques des institutions financières et de leurs vulnérabilités, à la fois concernant les activités incluses dans le bilan, les activités hors-bilan mais également toute forme de risque matériel identifié. Ce recensement est à la base de la calibration du stress-test et du principe de proportionnalité : l'analyse et les paramètres du stress-test doivent faire ressortir la nature, l'échelle, la taille et la complexité de l'institution concernée, ainsi que les caractéristiques de son portefeuille et de son modèle économique. Afin d'estimer ses vulnérabilités, l'analyse dite « par scénarios » est une des méthodes permettant de capturer l'ensemble des risques matériels et pertinents et fournit un jeu réduit de variables-clés dont l'évolution est cohérente avec chaque scénario.

⁹ Ces trois piliers sont : l'exigence de fonds propres, la procédure de surveillance de la gestion des fonds propres, la discipline de marché.

¹⁰ *Internal ratings-based approach*.

En première approche, la plupart des acteurs considèrent donc que les risques climatiques jouent un rôle « additionnel » de risques mais que celui-ci est déjà pris en compte dans l'approche par classes retenue par les superviseurs. Les risques climatiques sont essentiellement supposés se matérialiser à travers le risque de crédit et le risque de marché (ceux-ci couvrant en moyenne près de 9/10^e des actifs à risques pondérés dans les exercices de l'ABE). En particulier, le risque de crédit représente le montant principal des expositions et apparaît comme le principal canal de matérialisation du risque climatique. Les risques de marché, en général mineurs dans les RWA¹¹ des banques, font par ailleurs l'objet de stratégies de couverture, comme par exemple contre les variations du prix du carbone sur les marchés EU-ETS (BNP Paribas, 2016).

Les risques de liquidité font l'objet de tests de résistance spécifiques et restent encore en retrait du cadre de l'analyse par scénarios climatiques¹². Le risque opérationnel (en général jugé « idiosyncratique »¹³) est supposé se matérialiser par le canal des dommages aux actifs physiques, défini par le Comité de Bâle comme l'ensemble des pertes résultant de dégradation ou destruction des actifs physiques de la banque liés à des catastrophes naturelles ou d'autres événements; mais aussi par le canal des risques de responsabilité, et les risques d'action judiciaire auxquelles elles s'exposent du fait de leur inaction ou leur stratégie non durable (financement d'entreprises très émettrices par exemple).

		Risques de transition	Risques physiques	Risques de responsabilité
Banques	Prêts	Risque de crédit	Risque de crédit Risque de marché	
	Titres	Risque de crédit Risque de marché	Risque de crédit Risque de marché	
	Gestion courante		Risque opérationnel	Risque opérationnel
Assurances	Titres (actif)	Risque de crédit Risque de marché	Risque de crédit Risque de marché	
	Engagements (passif)	-	Risque assurantiel	Risque opérationnel

Tableau 2 : Risques ventilés par institutions et instruments financiers

Source : auteur.

2.2. Quels sont les risques de transition ?

Risques de transition

« Risques financiers liés au processus d'ajustement vers une économie bas-carbone. Changements de politiques, de technologies et risques physiques peuvent conduire à une réévaluation de la valorisation d'une large gamme d'actifs au moment où les coûts et les opportunités deviennent apparents. »

(Carney, 2015)

Selon la définition originelle du gouverneur de la Banque d'Angleterre, les risques de transition découlent de l'ensemble des processus conduisant à une diminution des émissions nettes d'une économie (ou au

¹¹ Les actifs à risques pondérés (*Risk-Weighted Assets*) sont une méthode de calcul des actifs ou expositions d'une institution financière (chaque actif étant pondéré en fonction de son risque) permettant de déterminer son exigence en fonds propres.

¹² Le risque de liquidité n'est pas couvert par des exigences en fonds propres mais encadré par des ratios.

¹³ C'est-à-dire qu'il est inhérent à l'activité de l'institution financière : procédures, facteurs humains, systèmes internes...

moins un fléchissement de la tendance observée). Toutefois, contrairement à des exercices de stress-test usuels, les analyses de sensibilité et l'hétérogénéité sectorielle des portefeuilles tendent à faire émerger, à la fois des institutions « perdantes » mais aussi des institutions potentiellement « gagnantes » dans plusieurs scénarios. A ce titre, un stress-test climatique peut faire ressortir les opportunités de certaines stratégies d'investissement orientées vers des actifs verts ; celles-ci seraient alors au contraire exposées à des scénarios d'absence de transition ou de transition incomplète. La définition de Mark Carney exclut donc, a priori, des risques de transition modélisés comme des scénarios d'inaction.

A travers cette définition, l'ADEME distingue deux grandes catégories de risques de transition :

- Les risques de transition liés à l'implémentation d'actions publiques suivant la survenue d'événements déclencheurs (réaction face à la matérialisation concrète des effets du changement climatique, meilleure perception de ses conséquences, actions collectives ou plaintes contre les Etats, etc.) ; ils sont plus ou moins coercitives et répondent à des objectifs variés (informer, inciter, offrir ou supprimer des alternatives) ; elles s'appuient sur des mécanismes économiques (signal-prix et rationalité des agents, contraintes sur l'offre pour faire évoluer la demande), mais également sur des mécanismes sociologiques et psychologiques (ADEME - S. Martin, A. Gaspard, 2016).
- Les risques de transition liés à des évolutions spontanées de l'économie, en réaction à des chocs technologiques ou une modification des préférences des agents¹⁴ (ménages, entreprises).

Classification	Leviers de transition
Actions de politique environnementale	Instruments de politique environnementale
Changements technologiques	Coûts des technologies bas carbone
	Substitution de produits par des options bas carbone
	Effets d'investissements infructueux
Evolutions des marchés	Technologies de capture et séquestration du carbone
	Modification des comportements des consommateurs
Réputation	Hausse du coût des matières premières
	Stigmatisation d'une entreprise ou d'un secteur

Tableau 3 : Classification des risques de transition

Source : auteur.

- (i) Les outils de politique environnementale, leur temporalité et la coordination des acteurs

Les instruments de politique environnementale, listés dans le **Tableau 4** ci-dessous, regroupent l'ensemble des mesures institutionnelles (locales, nationales, communautaires) visant à décourager ou interdire les comportements économiques émetteurs, ainsi que des exemples pratiques d'implémentation en France. Parmi elles, les instruments économiques visent à modifier l'environnement économique à travers des signaux-prix pour inciter les agents économiques à adopter des comportements moins émetteurs. L'effet attendu dépend de l'intégration par ces agents de ces nouveaux paramètres et se fait donc sur une base non coercitive. Toutefois, leur application peut reposer sur une contrainte (ex : taxe carbone). Les instruments économiques se distinguent des instruments réglementaires qui contraignent le comportement des agents sous la menace de sanctions économiques, administratives ou judiciaires. Ces instruments sont plus difficiles à intégrer à des scénarios climatiques par la modélisation. A titre d'exemple, l'ADEME utilise la méthode dite des « signaux-prix fictifs », technique qui peut « permettre de mimer rigoureusement des mesures de politique publique réglementaires... pour reproduire les chroniques de baisse d'émissions et d'investissements attendues » ; elle est « une approximation acceptable lorsque les effets de la mesure modélisée sont bien définis » (ADEME - G. Callonnec, H. Gouédard, P. Jolivet, 2020). Cette technique nécessite toutefois que la mesure ait fait l'objet d'études microéconomiques en amont.

¹⁴ A noter que de telles évolutions peuvent également être stimulées par ces mêmes actions publiques. Par exemple, selon les théories de la croissance endogène, une hausse des prix de l'énergie encouragerait l'innovation et la R&D dans ce secteur.

Catégorie	Instrument	Exemple
Instruments économiques	Fiscalité carbone	Composante carbone
	Fiscalité énergétique	TICPE
	Subventions	Bonus-malus automobile
	Marché de droits à polluer	Marché EU-ETS
	Pilotage du mix énergétique ¹⁵	Programmation Pluriannuelle de l'Energie
Instruments légaux	Normes d'émissions / Normes techniques	Normes européennes relatives aux émissions de CO2 des voitures & véhicules utilitaires légers
	Normes de produits	Obligation de pot catalytique pour les voitures
	Procédures de mise sur le marché	Normes d'émissions automobiles selon la procédure WLTP
	Interdictions	Interdiction annoncée de vente des véhicules thermiques d'ici 2040
Instruments informationnels	Ecolabels, éco-audits	Etiquette climat du diagnostic DPE
Instruments d'aménagement et d'infrastructure	Amélioration des réseaux, aménagement du territoire	Amélioration des réseaux de transport public
	Politiques de R&D et de formation	Stratégie pour l'hydrogène décarboné
Accords volontaires et négociés	Accords sur la réduction des émissions de CO2	Accords volontaires des constructeurs automobiles européens (1998)

Tableau 4 : Instruments de politique environnementale

Source : auteur, à partir des travaux de l'ADEME (2016).

Le NGFS (2020) introduit également plusieurs paramètres liés à l'implémentation de ces outils :

- la notion de temporalité : si l'action est mise en œuvre de manière lisse ou heurtée ;
- l'anticipation de l'action ou non ;
- la coordination internationale : si l'action est mise en œuvre simultanément dans le monde ou si certains pays font cavalier seul.

(ii) L'évolution du modèle économique

L'évolution du modèle économique peut à la fois être endogène et liée aux actions environnementales mises en œuvre et listées ci-dessus (les signaux encourageant des changements de comportement) ou être exogènes et perçues comme des évolutions spontanées de l'économie. I4CE (2017) distingue les risques de transition liés au marché, aux technologies et à la réputation des acteurs. Par exemple, la division par dix du coût de la production électrique solaire à grande échelle entre 2009 et 2020 (cf. **Figure 2**) peut constituer un exemple de matérialisation de risque de transition technologique.

¹⁵ Cette catégorie inclut à la fois le pilotage public (lorsque le mix énergétique est un bien public), mais aussi les politiques dites de tarifs de rachat (*feed-in-tariffs*) et les normes de portefeuilles d'énergies renouvelables (*renewables portfolio standards*).

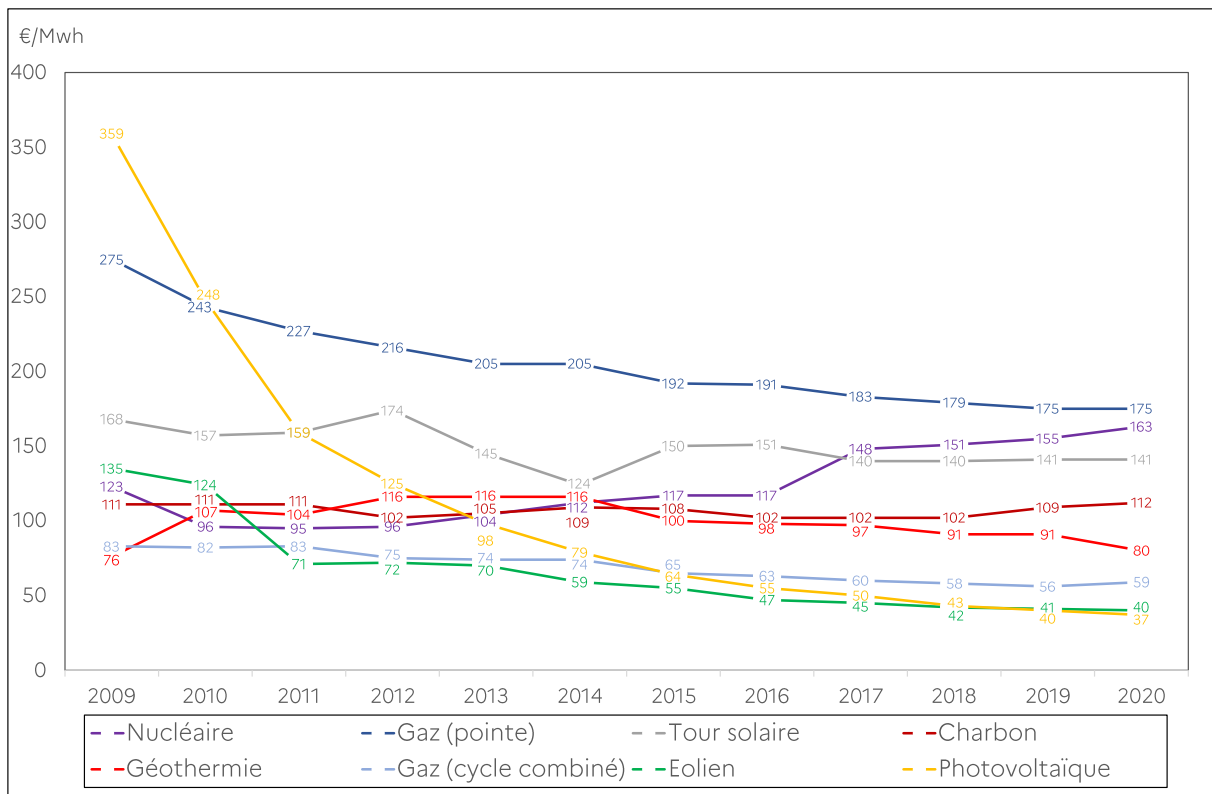


Figure 2 : Exemple d'un risque de transition - évolution des coûts actualisés de l'énergie moyens sans subvention

Source : Lazard (2020), Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Version 14.0.

2.3. Quels sont les risques physiques ?

Risques physiques

« Impacts aujourd'hui sur les passifs des assurances et la valeur des actifs financiers résultant des événements climatiques et météorologiques, telles que les inondations et les tempêtes qui endommagent les biens ou perturbent le commerce. »

(Carney, 2015)

Les risques physiques évoqués regroupent l'ensemble des dommages physiques liés au changement climatique dont on estime qu'ils auront un impact direct sur le fonctionnement de l'économie. Ces conséquences sont multiples, concernent un grand nombre de secteurs et de régions et sont difficilement quantifiables, car elles peuvent être corrélées entre elles et engendrer des effets supplémentaires (boucles de rétroaction positives ou négatives), ainsi qu'entraîner des conséquences irréversibles et imprévisibles à ce jour (points de basculement). A titre d'exemple, la BCE (2020) liste, de manière non exhaustive, les événements suivants, regroupés entre :

- les risques aigus, lorsqu'ils se matérialisent par des événements extrêmes non prévisibles : sécheresses, inondations, orages/tempêtes ;
- les risques chroniques, lorsqu'ils se matérialisent par des évolutions progressives d'événements périodiques déjà existants : variation de température, montée du niveau de la mer, pénurie d'eau, pertes de diversité, rareté des ressources.

	Température	Vent	Eaux	Masse solide
Chroniques	Evolution de la température (air, eau de mer, eau de fleuve)	Modification des régimes de vent	Modification des régimes de précipitation (pluie, grêle, neige/glace)	Erosion côtière
	Stress thermique		Précipitation ou variabilité hydrologique	Dégradation des sols
	Fonte du permafrost		Montée du niveau de la mer	Erosion des sols
	Variabilité des températures		Intrusion saline	Solifluxion
Aigus	Vague de chaleur	Cyclones, ouragans, typhons	Sécheresse	Avalanche
	Vague de froid/gel		Fortes précipitations (pluie, grêle, neige/glace)	Glissement de terrain
	Incendies	Orages (blizzards, poussière et tempêtes de sable)	Inondation (côtière, fluviale, pluviale, souterraine)	Affaissement
		Tornades	Vidange brutale d'un lac glaciaire	

Tableau 5 : Classification des risques physiques

Source : Actes délégués pour la taxonomie européenne (2020).

Une première revue de littérature permet toutefois de dégager plusieurs niveaux d'impacts :

- un niveau macroéconomique, la DG Trésor recensant par exemple trois principaux canaux de transmission des risques physiques perturbant le fonctionnement de l'économie dans son ensemble, via des effets sur la santé, la productivité du travail et le commerce international ;
- un niveau sectoriel, mettant en évidence quatre secteurs particulièrement exposés : le secteur agricole, le secteur énergétique, le secteur des infrastructures et le tourisme.

Afin d'évaluer les coûts du changement climatique, l'ADEME a réalisé un recensement exhaustif de l'ensemble des conséquences économiques du changement climatique observées en France à ce jour. Il s'est effectué en se concentrant individuellement sur chaque canal d'impact, en détaillant les méthodes et modèles employés pour obtenir les résultats de référence, et en proposant une calibration de ces impacts au niveau de la France (cf. **Tableau 6** et **Annexe 4**)

Phénomène environnemental	Canal d'action économique
Hausse du niveau de la mer	Perte de capital (infrastructures)
Hausse de la température et modification du PH de la mer	Rendements piscicoles
Hausse de la température de l'air et modification du régime de précipitations	Rendements sylvicoles Rendements agricoles Revenus du tourisme Productivité au travail Demande énergétique Rendements énergétiques
Evènements climatiques extrêmes (tornades, inondations, canicules, feux...)	Productivité au travail Perte de capital (infrastructures)
Perte de biodiversité	Services écosystémiques rendus par la biodiversité Diminution des pollinisateurs
Maladies	Productivité au travail

Tableau 6 : Synthèse des impacts économiques de l'évolution du climat en France

Source : ADEME.

2.4. Evaluer les risques climatiques des contreparties des institutions financières

Un consensus apparaît entre tous les acteurs : l'exposition aux risques climatiques doit se traduire à la fois par des scénarios macroéconomiques et financiers suffisamment nombreux pour appréhender l'ensemble des incertitudes mais aussi à travers une déclinaison des impacts spécifiques à un niveau granulaire sectoriel et régional fin et une variété de scénarios la plus large possible. Première à évaluer l'effet d'un scénario de transition énergétique, la Banque des Pays-Bas (2018) reconnaît que les expositions des banques néerlandaises sont à la fois domestiques et internationales¹⁶ et très hétérogènes selon les secteurs. L'ACPR soutient que la prise en compte des risques climatiques nécessite des « adaptations substantielles, relatives en particulier à l'horizon de l'exercice, la dimension internationale des expositions et la segmentation des portefeuilles en fonction des activités » (2020).

(i) Expositions au risque de transition

La transition vers une économie décarbonée conduira l'ensemble des acteurs économiques à diminuer sensiblement, à la fois leurs émissions directes mais également leur empreinte carbone. Celles-ci sont à la fois liées à la production et la consommation énergétique des acteurs, à l'intensité carbone de l'énergie consommée (découlant du mix énergétique retenu en amont) mais également à des émissions directes hors énergie, en particulier présentes dans le secteur de l'industrie lourde. En particulier, neuf secteurs industriels manufacturiers sont identifiés par l'ADEME et font l'objet de plans de transition sectoriels : papier carton, industrie chimique (éthylène, ammoniac, chlore), métallurgie (acier, aluminium), industrie alimentaire (sucre) et industrie minérale (ciment, verre).

Au niveau européen, il ressort des statistiques officielles que les émissions de carbone du secteur non financier sont très hétérogènes, à la fois au niveau sectoriel ou au niveau régional, ce qui tend à encourager des approches granulaires plus fines que pour des analyses de risque usuelles. Une telle approche peut reposer sur un nouvel indicateur proposé par la Banque des Pays-Bas (Vermeulen, et al., 2018) : le facteur de vulnérabilité à la transition (*Transition Vulnerability Factor*), peu à peu repris par les superviseurs et la recherche académique. Par définition, cet indicateur est calculé comme l'ensemble des émissions de CO₂¹⁷ rejetées pour produire les biens et services finaux d'une entreprise ou d'un secteur (*embodied emissions*), pour une unité de valeur ajoutée, et au regard de la moyenne de l'économie. En particulier, cet indicateur peut inclure, selon la disponibilité des données, aussi bien les émissions directes que les émissions indirectes liée à la chaîne de valeur des secteurs ; dans le cas de l'exercice des Pays-Bas, il inclut les émissions directes de chaque industrie et celles de ses fournisseurs, mais n'inclut pas l'ensemble du périmètre des émissions, en particulier toutes celles du Scope 3 défini par l'ADEME, incluant l'ensemble de cycle de vie des produits (cf. **Tableau 7**), ces données restant peu disponibles à des niveaux agrégés.

Niveaux	Périmètres d'émissions	Exemples
Scope 1	Emissions directes (provenant des sources détenues ou contrôlées par l'organisme)	Combustion des sources fixes et mobiles, procédés industriels hors combustion, ruminants
Scope 2	Emissions à énergie indirecte	Consommation d'électricité, de vapeur, chaleur ou froid
Scope 3	Autres émissions indirectes (non comptabilisées au 2 mais liées à la chaîne de valeur complète)	Achat de matières premières, déplacements des salariés, transport amont et aval des marchandises, gestions des déchets, fin de vie des produits

Tableau 7 : Catégories d'émissions et périmètre opérationnel du Bilan GES

Source : ADEME.

Au niveau européen, un tel calcul reste compliqué, notamment pour calculer l'empreinte carbone totale d'une activité, mais des indicateurs intermédiaires permettent d'observer une forte hétérogénéité des expositions entre secteurs et entre pays. Dans le cas de la France, le seul secteur énergétique se distingue

¹⁶ 50 % des banques et assurances néerlandaises sont exposées à des contreparties étrangères. Cette part s'élève jusqu'à 86 % pour les fonds de pension.

¹⁷ Il pourrait également intégrer l'ensemble des émissions de GHG, au regard des instruments déployés pour lutter contre les émissions dans les scénarios de transition.

particulièrement du fait d'un mix très décarboné. Un tel indicateur permet de mesurer l'exposition relative de chaque secteur à un scénario de transition, mais fait l'objet de plusieurs limites :

- L'insuffisance des données concernant les émissions indirectes, mais aussi l'ensemble du cycle de vie du produit ; par exemple, l'industrie extractive apparaît peu exposée, à la fois selon le Scope 1 (émissions directes), le Scope 2 (émissions énergétiques indirectes) mais est la source en amont d'une majorité des émissions de l'économie et devrait apparaître comme un des secteurs les plus vulnérables aux risques de transition.
- La relative imprécision de certaines données ; comme le note le Comité européen du risque systémique, les marchés financiers adoptent encore des stratégies très différenciées pour *pricer* les risques climatiques et ne pratiquent pas encore une allocation efficiente des capitaux, à la fois à cause d'une prise en compte insuffisante des externalités, mais aussi du fait du manque d'informations. Celles-ci restent à ce-jour « insuffisantes (les entreprises reportent de manière inégale), incomplètes (elles ne reportent que les émissions liées à la production et omettent les émissions du cycle de vie des produits) et inconsistante (sujettes au *greenwashing*) » (Despres & Hiebert, 2020).
- Des nomenclatures inadaptées à l'évaluation des risques ; comme le notent Battiston *et al.* (2016), les classifications standards des activités économiques, comme la NACE¹⁸ ou la NAICS¹⁹, pourraient s'avérer inadaptées à l'exposition du secteur financier aux risques de transition. Par exemple, la section B de la NACE (industries extractives) inclut des activités sans relation avec l'extraction de combustibles fossiles, tandis que de telles activités peuvent être associées à d'autres secteurs (industries manufacturière ou transport).
- La non-prise en compte des capacités d'adaptation des secteurs face à la transition (part des consommations intermédiaires émettrices, possibilités de substitution, pouvoir de marché, degré d'ouverture à la concurrence internationale...); comme explicité dans la section 4., de telles approches peuvent toutefois être mobilisées dans les modèles macroéconomiques ;
- L'hétérogénéité des niveaux d'émissions des firmes au sein d'un même secteur, certaines entreprises conduisant leurs activités de manière plus sobre et plus efficace (Despres & Hiebert, 2020); toutefois, la disponibilité de ce niveau d'informations reste à ce jour incomplète, et l'observation à un niveau sectoriel (qui est celui de la modélisation macroéconomique) entraîne nécessairement un biais méthodologique.
- L'évolution de ce facteur dans les différents scénarios de transition considérés ; une transition faisant l'objet d'un mix énergétique plus renouvelable pouvant par exemple augmenter l'exposition relative des énergies fossiles (Vermeulen, *et al.*, 2018).

¹⁸ La NACE (Nomenclature des Activités économiques dans la Communauté Européenne) désigne la classification des activités économiques en vigueur dans l'Union européenne (UE). La troisième révision de la NACE, la NACE Rév. 2, adoptée à la fin de l'année 2006, est mise en œuvre depuis 2007.

¹⁹ La NAICS (*North American Industry Classification System*) est une nomenclature statistique des activités économiques pour l'Amérique du Nord.

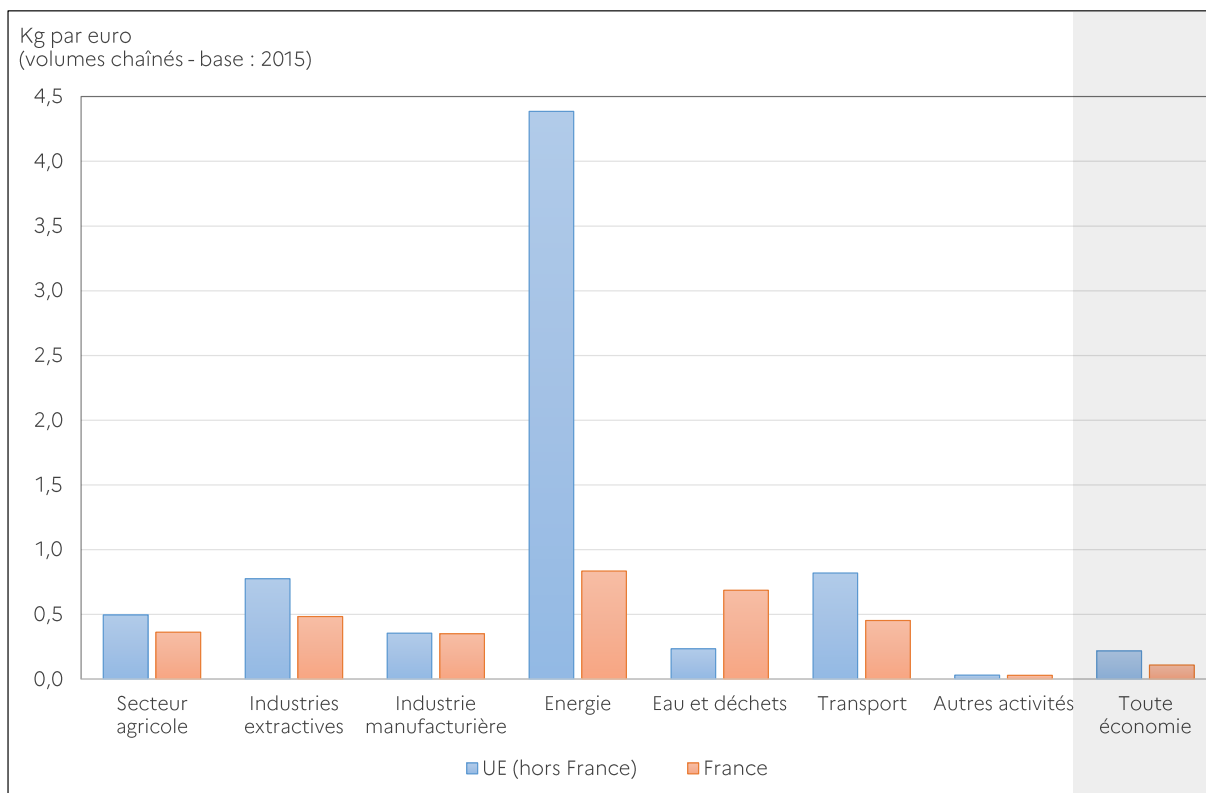


Figure 3 : Intensité des émissions de CO₂ dans l'air²⁰ par activité économique

Source : Eurostat, calculs de l'auteur.

Note : les émissions de CO₂ sectorielles sont issues des comptes d'émissions atmosphériques. Elles incluent les émissions produites par les activités économiques des unités résidentes, indépendamment de leur occurrence sur le sol national ou non (« principe de résidence »). Elles n'incluent pas les émissions causées par la consommation privée des ménages (utilisation de véhicules privés et chauffage de logement notamment).

D'autres travaux académiques choisissent d'explorer davantage les expositions des secteurs au risque de transition. En particulier, Battiston et Monasterolo (Monasterolo, 2019) identifient cinq secteurs particulièrement exposés au risque de transition, dits « *climate policies relevant sectors* » (CPRS) : carburants fossiles, production et distribution d'énergie, secteurs énérgo-intensifs, transport et logement. Cette classification repose sur trois critères distincts :

- les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre (Scopes 1, 2 et 3) ; les auteurs relèvent également la difficulté d'évaluer ce champ de manière exhaustive, le seul Scope 1 étant facilement à disposition des acteurs (cf. **Figure 3**) ; par exemple, les industries extractives sont responsables de peu d'émissions directes et d'émissions énérgétiques indirectes mais contribuent massivement aux émissions du reste de l'économie ;
- la place dans la chaîne d'approvisionnement énérgétique : en particulier, les secteurs sont distingués selon qu'ils soient fournisseurs de carburants fossiles, fournisseurs d'électricité ou utilisateurs de carburants fossiles ou d'électricité ;
- la pertinence pour des politiques publiques de transition, liées par exemple au risque de fuite de carbone ou à la présence historique de l'Etat dans certains secteur (ex : énérgie, transport).

Comme cela sera évoqué plus loin, des approches encore plus fines se distinguent, en particulier dans les modèles macroéconomiques dédiés à la transition énérgétique qui affinent par exemple la désagrégation sectorielle avec l'exposition de chaque secteur à la concurrence internationale.

²⁰ Cet indicateur rapporte le niveau d'émissions directes de chaque secteur par unité de valeur ajoutée.

- Ménages

Les ménages semblent essentiellement exposés au risque de transition relié aux outils économiques et aux signaux-prix envoyés par la politique fiscale (voir la partie 3.). Selon l'ADEME, la composante carbone de 44,6 €/tCO₂ aurait contribué à 5,2 Md€ de recettes fiscales en 2018, soit près de 0,4 % du revenu brut disponible des ménages français (ADEME, 2019), répartis entre 0,23 % au titre de la consommation de carburant et 0,15 % pour le chauffage des bâtiments).

A ce titre, une hausse de fiscalité vers les cibles définies par la communauté scientifique pour atteindre la neutralité carbone (~650€/tCO₂ en 2050) fait peser un risque élevé sur la solvabilité des ménages. En particulier, la fiscalité énergétique est régressive et son impact apparaît très hétérogène parmi les différents déciles de ménages français : son impact pèserait en moyenne presque cinq fois plus en proportion du revenu pour les 10% des ménages les plus modestes que les plus aisés, alors que le niveau d'émissions associées à l'usage du véhicule personnel et au logement serait trois fois plus élevé pour ces derniers. Le lieu de résidence apparaît être un élément déterminant, l'offre de transport alternatif à l'automobile étant moins concentrée dans les plus petites zones urbaines (< 20 000 habitants).

Par ailleurs, les ménages pourraient être soumis à un fort risque de revalorisation des biens immobiliers lorsque ceux-ci sont localisés dans des zones jugées à risques (par exemple : littoral) : en plus de peser sur leur patrimoine et sur leur solvabilité financière, ces risques font peser un risque de crédit direct sur les banques, lorsque les biens servent de collatéral aux prêts immobiliers.

- Souverains

Généralement considérées comme des actifs sans risque dans les portefeuilles financiers, les obligations d'Etat font également l'objet d'une attention accrue face aux risques climatiques. Certains modèles de risque les considèrent explicitement comme exposés au risque de défaut de paiement (Battiston & Monasterolo, 2019). Les facteurs de risque regroupent les fondamentaux usuellement considérés dans les modèles financiers, qui seraient affectés dans des scénarios adverses : croissance économique, taux d'inflation, taux d'intérêt, ratio dette/PIB, solde public primaire, composition du budget, évolution des marchés financiers... Ils sont également exposés au risque de marché, le prix dépendant alors de la manière dont les acteurs choisissent de *pricer* les risques climatiques futurs, au jour le jour, au regard des ambitions futures et des politiques climatiques annoncées. Certains auteurs soulignent qu'à ce jour, le prix des obligations ne reflète pas l'ensemble des informations climatiques disponibles aux investisseurs.

(i) Expositions aux risques physiques

Les risques physiques font également ressortir une hétérogénéité à la fois aux niveaux sectoriel et géographique. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) note que des trajectoires de réchauffement dépassant les 2°C d'ici la fin du siècle causeraient des dommages physiques plus élevés et que ceux-ci seraient très hétérogènes en fonction des zones géographiques et de leurs écosystèmes. L'ensemble de ses projections climatiques (RCP 2.6 à 8.5) met en évidence une matérialisation hétérogène des risques à travers notamment trois principaux indicateurs climatiques et physiques : la température moyenne à la surface, les précipitations annuelles moyennes et le niveau de la mer (cf. **Tableau 8**). D'autres initiatives existent, comme celle de l'indice d'adaptation de l'Université de Notre-Dame (ND-GAIN) qui mesure la vulnérabilité spécifique de chaque pays comme la « propension ou la prédisposition des sociétés humaines à être impactées négativement par les événements climatiques », à travers l'exposition spécifique à 6 secteurs : l'alimentation, l'eau, la santé, les services à l'écosystème, les habitations et les infrastructures. Ces indicateurs sont ensuite déclinés en trois composantes : le niveau d'exposition du secteur (dommages directs du changement climatique), sa sensibilité (effets indirects liés aux dommages subis par d'autres agents dont ils dépendent) et sa capacité d'adaptation (cf. **Figure 4**).

En plus d'impacts socio-économiques, qui pourraient affecter les économies sur le plan agrégé (santé, productivité du travail, commerce international), le recensement réalisé par la DG Trésor (2020) met en évidence quatre secteurs non financiers dépendant des conditions climatiques et météorologiques : le secteur agricole, le secteur énergétique, le secteur des infrastructures et le tourisme. Le recensement fait par l'ADEME fait également ressortir une variété d'impacts sectoriels pour le seul cas français (cf. **Tableau 6** et **Annexe 4**). Peu d'indicateurs permettent encore d'évaluer, de manière qualitative ou quantitative, l'exposition aux risques physiques, mais le Comité européen du risque systémique (2020) note que la

localisation géographique des activités pourrait donner un premier aperçu de la résilience. Ces approches restent à ce jour peu généralisables et restent à l'initiative des secteurs et acteurs individuels²¹.

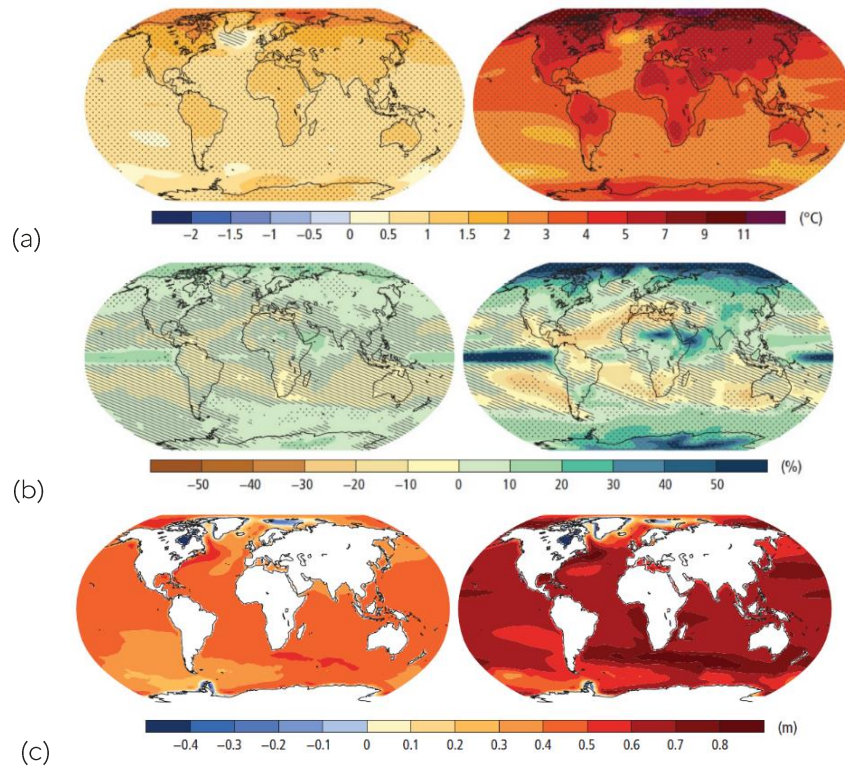


Tableau 8 : Evolutions de la température moyenne à la surface (a), des précipitations moyennes annuelles (b) et du niveau moyen de la mer (c), profil RCP 2.6 (gauche) et RCP 8.5 (droite)

Source : IPCC (2014), *Climate Change 2014: Synthesis Report*.

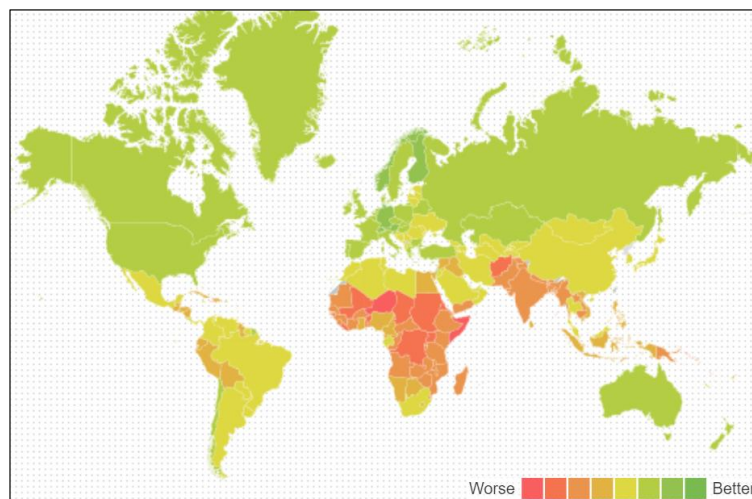


Figure 4 : Indice de vulnérabilité au changement climatique ND-GAIN

Source : Notre Dame-Global Adaptation Index (ND-GAIN) Country Index.

²¹ A titre d'exemple, le CDP (*Carbon Disclosure Project*) analyse principalement, pour le secteur de l'acier, les risques physiques par rapport à la disponibilité de l'eau. Pour les risques liés à la transition, il analyse l'alignement des trajectoires d'intensité carbone en scope 1 et 2 ainsi que la transparence des données climat.

2.5. Confronter les risques climatiques aux expositions sectorielles et géographiques des institutions financières

La composition sectorielle des portefeuilles des institutions financières reste difficile d'accès et à la seule disposition des superviseurs et des banques centrales, bien que leur collecte ne soit pas à l'origine réalisée dans une optique climatique (par exemple la publication de l'exercice de transparence de l'Autorité bancaire européenne répartit le risque de crédit selon les différents secteurs des contreparties). Il existe à ce jour un manque de données granulaires et d'informations relatives à la ventilation sectorielle, qui doit souvent faire l'objet d'un travail d'estimation statistique et comptable préliminaire. Au niveau des activités de prêts, la ventilation estimée par la BCE laisse entrevoir une faible exposition des institutions financières au secteur extractif (0,5 %) et de l'énergie (5,1 %), qui sont les secteurs les plus contributeurs aux émissions directes (cf. **Tableau 9 et Figure 5**), mais celle-ci pourrait être largement impactée par les chaînes d'approvisionnement et l'exposition indirecte des secteurs intensifs en énergie.

La mise en œuvre prochaine d'une taxonomie européenne contribuerait à faciliter l'accès à cette information, notamment par la communication de la proportion des investissements sous-jacents qui sont alignés sur ses principes, exprimée en pourcentage de l'investissement, du fonds ou du portefeuille²². La granularité pourrait alors en théorie être affinée en fonction des activités réelles financées par les instruments. Les institutions financières notent pourtant que la communication à un tel niveau reste inenvisageable et que le principe de taxonomie n'est pas applicable et extensible à toutes les activités de prêts.

Code NACE	Activités économiques	% total (T2 2020)
A	Agriculture, sylviculture et pêche	4,1
B	Industries extractives	0,5
C	Industrie manufacturière	14,4
D-E	Production et distribution d'électricité, de gaz, de vapeur et d'air conditionné Production et distribution d'eau; assainissement, gestion des déchets et dépollution	5,1
F	Construction	7,1
G	Commerce Réparation d'automobiles et de motocycles	12,6
H-J	Transport et entreposage ; information et communication	8,5
I	Hébergement et restauration	3,6
L-M-N	Activités immobilières Activités spécialisées, scientifiques et techniques Activités de services administratifs et de soutien	37,7
P-Q-R-S-T-U	Autres activités	6,5

Tableau 9 : Ventilation sectorielle des en-cours de prêts des institutions financières monétaires (IFM) aux sociétés non financières, par activité économique

Source : Banque centrale européenne.

Au niveau européen, bien que les expositions directes des institutions financières au secteur des énergies fossiles soient estimées comme assez limitées (de 3 à 12% selon les institutions), l'inclusion de tous les secteurs dépendant de la chaîne d'approvisionnement fossile feraient ressortir une exposition « très large, hétérogène et potentiellement amplifiée par des expositions indirectes à travers les contreparties financières » (Battiston, Mandel, Monasterolo, Schütze, & Visentin, 2016). L'ABE estime ainsi, à partir d'un échantillon d'expositions, que près de 55 % des expositions bancaires seraient liées à des secteurs exposés au risque de transition (EBA, 2020).

²² L'obligation de publication s'applique uniquement à certains produits. Pour les autres, la publication de ces informations est préconisée (principe du « comply or explain »).

L'analyse des données de risque de crédit des banques européennes suivies par l'ABE laisse entrevoir des expositions très hétérogènes entre acteurs, en particulier sur certains secteurs particulièrement exposés comme l'industrie manufacturière ou la construction (cf. **Tableau 10**). Ce constat semble également valoir pour les principales banques françaises, avec une exposition plus marquée sur les activités de service (cf. **Tableau 11**) et une exposition plus faible sur des secteurs directement à risque que sont les industries extractives ou le secteur énergétique. Sur une plus longue période, la BCE observe que les expositions des banques aux émissions ont peu évolué, et ce malgré une tendance à la décarbonation de l'économie, ce qui suggère que l'orientation des investissements aurait peu profité à des acteurs verts (Despres & Hiebert, 2020).

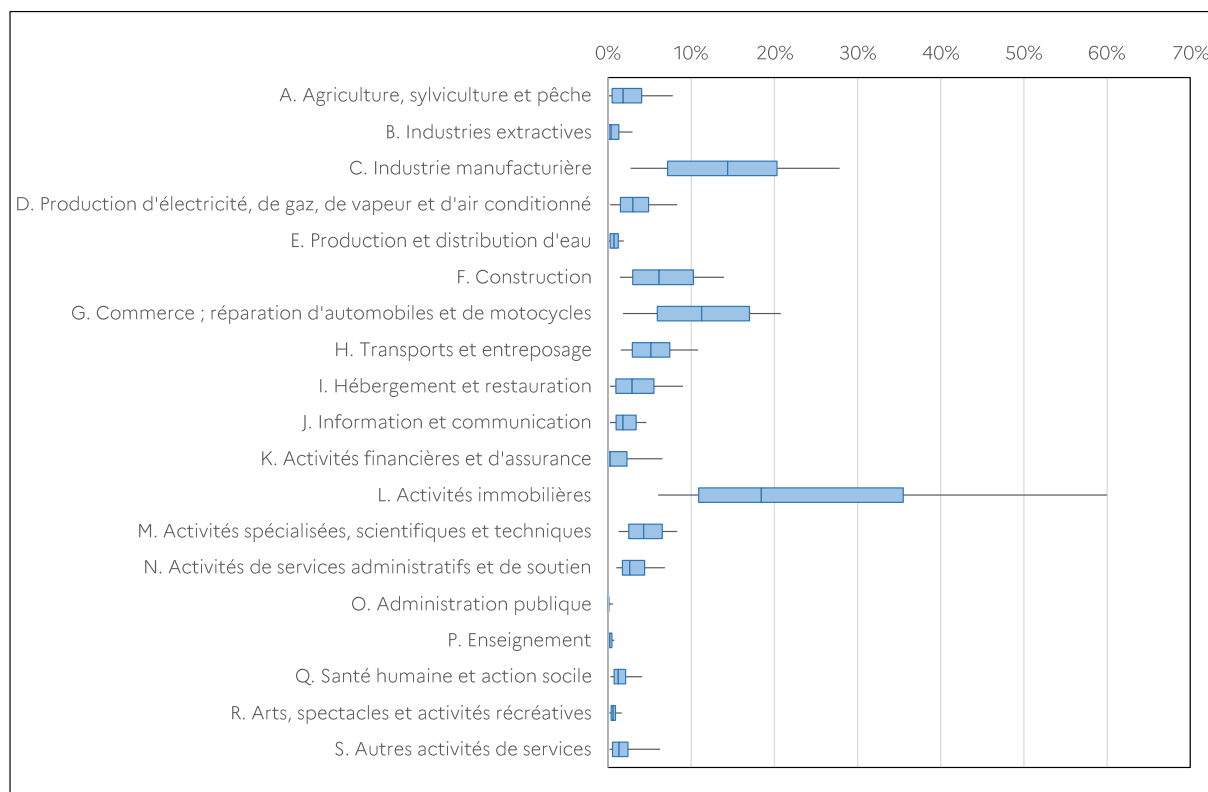


Tableau 10 : Distribution des secteurs de contrepartie des prêts et avances des banques européennes au secteur non financier (30 juin 2020)

Source : exercice de transparence de l'ABE à l'échelle de l'UE (automne 2020), calcul de l'auteur.

Note : Les trois extrémités des deux rectangles représentent, de gauche à droite, le 1^{er} quartile, la médiane et le 3^{ème} quartile. Les segments aux extrémités mènent, à gauche au 1^{er} décile, à droite au 9^{ème} décile (les valeurs extrêmes sont exclues).

Les données représentent 129 banques parmi 26 pays au niveau de consolidation le plus agrégé de l'UE (27) et de l'espace économique européen (EEE), ainsi que six établissements du Royaume-Uni. Sont considérés les montants bruts et exclues les dépréciations cumulées ainsi que les réévaluations à la baisse des prêts non performants à la juste valeur.

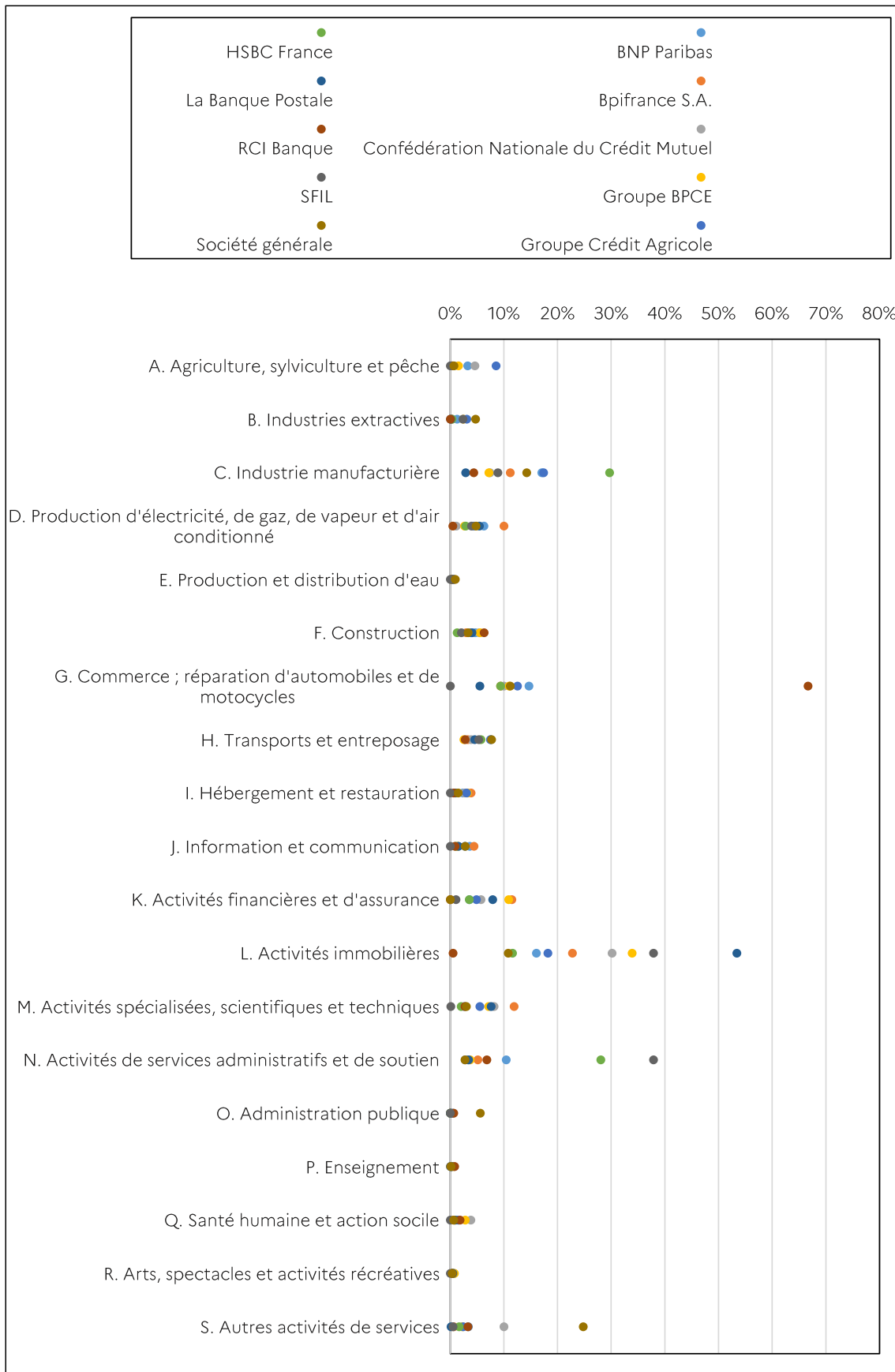


Tableau 11 : Secteurs de contrepartie des prêts et avances des principales banques françaises au secteur non financier, au 30 juin 2020

Source : exercice de transparence de l'ABE à l'échelle de l'UE (automne 2020), calcul de l'auteur.

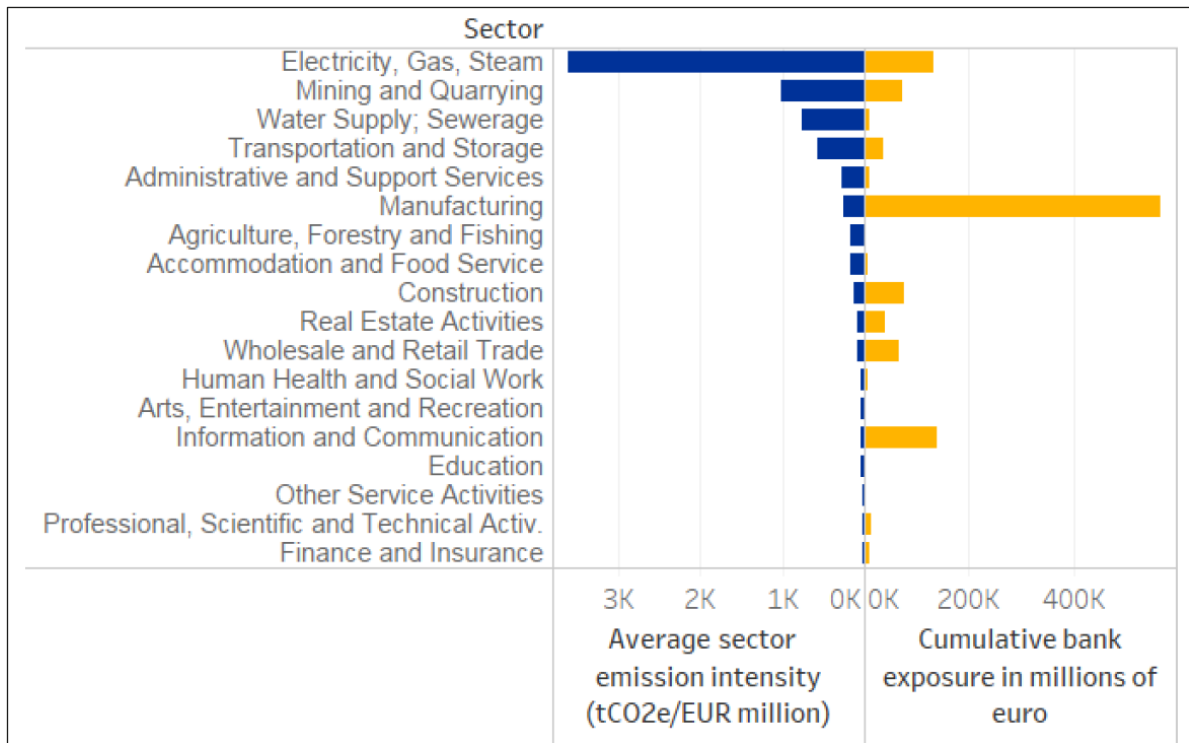


Figure 5 : Intensité des émissions de CO2 dans l'air et expositions bancaires cumulées, par activité économique (2018)

Source : Despres, M. and Hiebert P. (2020), *Positively green : Measuring climate change risks to financial stability*.

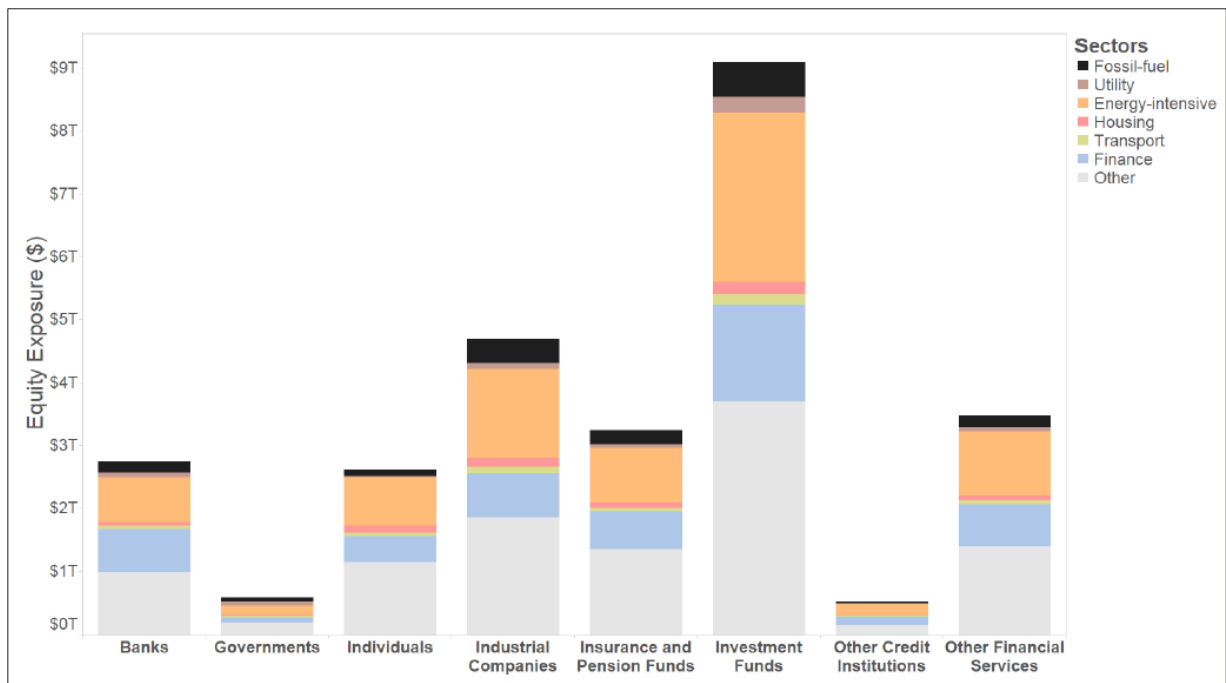


Figure 6 : Ventilation sectorielle des titres de participation détenus par les institutions financières européennes dans des sociétés cotées (US/EU), par type d'institutions

Source : Battiston et al. (2017), *A climate stress-test of the financial system*.

Concernant les risques physiques, les expositions des portefeuilles des institutions bancaires françaises sont essentiellement concentrées en Europe, à hauteur de 75,8 %, dont 52,9 % en France²³ en 2018 (cf. **Figure 7**). Pour le seul risque de crédit, les grandes banques françaises seraient exposées à hauteur de 60 %²⁴ sur des contreparties françaises, avec toutefois une hétérogénéité forte et une exposition internationale plus ou moins marquée selon les acteurs. L'ACPR note que la majorité des engagements sont localisés dans des zones tempérées et apparaissent donc « modérément exposés sans être pour autant épargnés ». Toutefois, de tels indicateurs sont encore limités pour capter l'ensemble des risques, en particulier des risques aigus, imprévisibles et qui échappent encore aux projections d'impact physique.

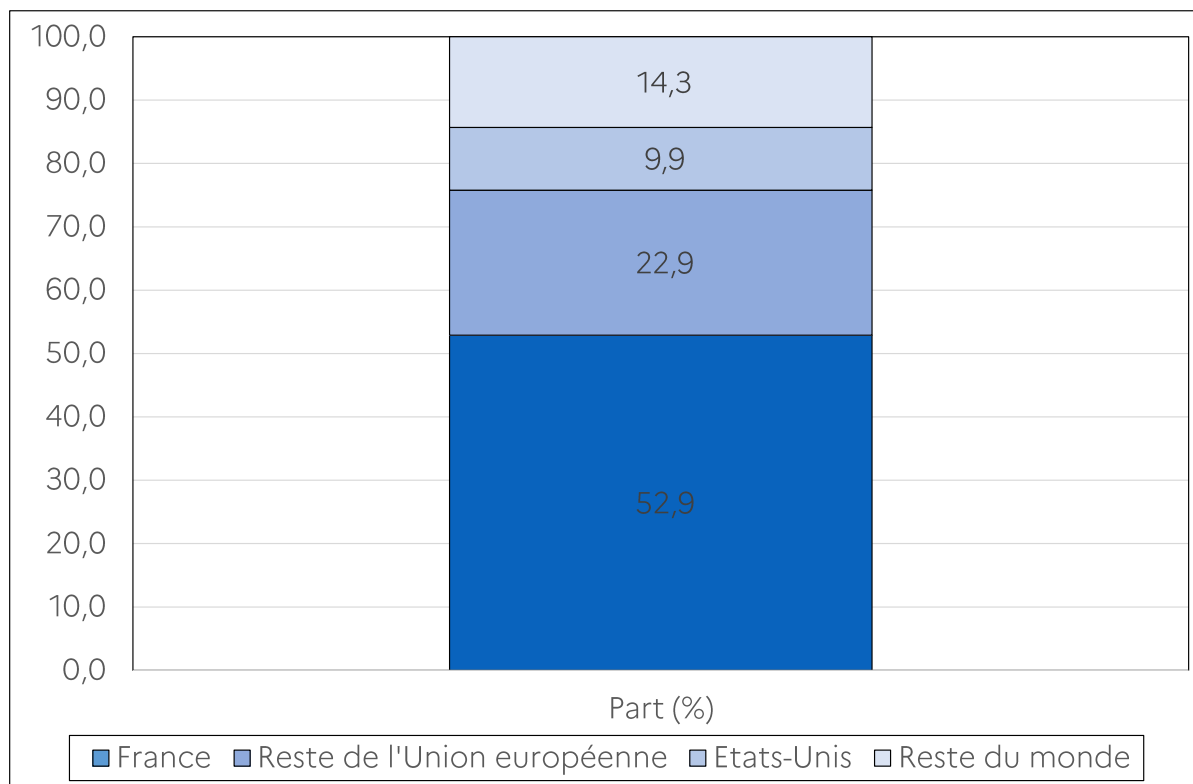


Figure 7 : Répartition des engagements bruts totaux des principaux établissements bancaires français par zone géographique, au 30 juin 2018

Source : ACPR (2019), *Les groupes bancaires français face au risque climatique*.

Note : les banques de l'échantillon de l'ACPR sont : BNP Paribas, BPCE, Crédit Agricole, Crédit Mutuel, HSBC France, La Banque Postale, Société Générale.

À noter que la répartition des risques entre secteur bancaire et secteur assurantiel ne fait pas encore consensus parmi les différents acteurs, et semble dépendre de l'amplitude des risques physiques auquel sont exposés les portefeuilles (souvent majoritairement exposés au niveau national). Dans son exercice-pilote, l'ACPR (2020) suppose que les risques physiques sont uniquement portés par le secteur assurantiel ; par ailleurs, elle juge que « banques et assurances semblent majoritairement peu exposées », du fait d'une faible exposition à des zones jugées vulnérables et de l'existence d'un dispositif efficace de prise en compte des catastrophes naturelles. De son côté, le FMI juge, dans le cadre du Programme d'évaluation du secteur financier (FSAP²⁵) mené sur les Bahamas, que les catastrophes naturelles peuvent affecter le secteur bancaire à travers l'emploi des ménages ; en particulier dans le secteur du tourisme, dont les perturbations de l'activité conduiraient à une élévation du chômage et à des pertes sur les hypothèques et les crédits à la consommation (IMF, 2019).

²³ Excepté les Etats-Unis, la principale exposition hors Europe est le Japon.

²⁴ Les estimations de l'ADEME sont réalisées à partir de l'exercice de transparence de l'ABE, au 30 juin 2020, selon la méthode de valorisation de l'*original exposure value*.

²⁵ *Financial Sector Assessment Program*.

L'Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles (EIOPA) identifie plusieurs facteurs affectant la répartition des risques physiques entre acteurs économiques et causant un trou de protection assuranciel des risques climatiques (*protection gap*) : au global, 35% des pertes causées par des vagues de température extrêmes et des événements climatiques seraient actuellement non couvertes par les assurances (EIOPA, 2019). Les pays européens auraient des couvertures très hétérogènes selon les risques (cf. **Tableau 12**). Certains pays possèdent un dispositif de réassurance, public ou privé, pour pallier à ce trou assuranciel²⁶. Les exercices de stress-tests menés tendent alors à montrer que la majeure partie des risques physiques européens seraient portés par la réassurance (réassureurs et assureurs impliqués dans ces activités), plus de la moitié des pertes financières étant transférées à ces organismes²⁷.

	<i>Protection gap</i>	Tremblement de terre	Inondation	Incendie	Tempête
Allemagne	1,6	1,6	2,6	1,0	1,1
Autriche	2,0	1,8	3,4	2,6	0,0
Belgique	1,7	1,3	1,9	2,0	1,6
Bulgarie	2,0	3,2	1,7	2,0	1,2
Chypre	1,9	2,5	1,0	3,0	1,0
Croatie	2,4	2,8	2,0	3,0	1,6
Danemark	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Espagne	0,9	0,0	0,0	2,0	1,4
Estonie	1,1	0,0	0,0	3,0	1,5
Finlande	0,7	0,0	1,0	0,0	1,8
France	0,5	0,0	0,0	2,0	0,0
Grèce	2,2	3,5	1,7	2,0	1,6
Hongrie	1,3	1,3	1,9	1,0	1,1
Irlande	0,7	0,0	0,0	1,0	1,9
Islande	1,0	1,0	1,0	n/a	1,0
Italie	2,4	3,5	1,7	2,0	2,5
Lettonie	0,9	0,0	1,0	1,0	1,7
Lituanie	1,3	0,0	1,0	2,0	2,0
Luxembourg	1,6	1,3	2,0	2,0	1,1
Malte	2,3	2,8	1,7	3,0	1,6
Norvège	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pays-Bas	1,9	2,0	4,0	0,0	1,6
Pologne	1,6	2,0	1,0	1,0	2,3
Portugal	2,0	1,8	1,6	3,0	1,7
Rép. tchèque	1,9	1,8	2,0	2,0	1,6
Roumanie	1,7	3,1	1,6	1,0	1,2
Slovaquie	2,4	1,9	3,0	3,0	1,6
Slovénie	1,5	2,4	1,3	1,0	1,2
Suède	0,4	0,0	0,0	0,0	1,6
UE	1,0	1,0	1,0	1,6	1,0

Tableau 12 : Trous de protection assuranciels en Europe

Source : EIOPA (2020), *The pilot dashboard on insurance protection gap for natural catastrophes in a nutshell*.

Note : Un score de 0 correspond à un trou de protection inexistant, un score de 4 à un trou très élevé. Il est calculé comme une moyenne entre trois scores : l'exposition au risque, la vulnérabilité et la couverture assurancielles. Selon l'EIOPA, un trou de protection inférieur à 3 n'est pas retenu comme significatif.

²⁶ Par exemple, la Caisse Centrale de Réassurance en France.

²⁷ L'EIOPA indique que les événements simulés lors de ces stress-tests ne découlent pas spécifiquement du changement climatique. Les exercices ne modélisent donc pas les conséquences de tels scénarios, mais indiquent les effets d'une hausse de la sévérité et de l'intensité des catastrophes naturelles.

3. Définition d'un scénario de stress-test climatique

3.1. Une vision prospective du climat, de la société et de l'économie par le GIEC

Une démarche de stress-test doit reposer en amont sur une analyse préalable des principaux risques auxquels sont exposées les institutions, notamment en fonction des secteurs institutionnels et des activités financières concernées, ainsi que sur l'identification des canaux de transmission des risques à l'économie. Ces risques peuvent se lire dans les cinq grandes trajectoires socio-économiques partagées du GIEC, dits « SSP »²⁸ et la comparaison des scénarios, basés sur l'architecture « en matrices » (cf. **Annexe 1**).

Chaque famille SSP est définie par un même narratif socioéconomique et par un même jeu de données quantitatives (PIB, population, taux d'urbanisation). Les trajectoires socio-économiques partagées sont réalisées à partir d'un ensemble de modèles d'évaluation intégrée (dits modèles « IAM »), développés par la communauté scientifique et académique et traduisent les implications de ces narratifs en termes d'énergies, d'utilisation des sols et, par la suite, des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques qui en découlent. A chaque scénario SSP est associé un modèle marqueur, visant à représenter une trajectoire de référence pour chaque scénario et guidé par un souci de cohérence des modèles et de leur capacité à s'adapter à des narratifs spécifiques.

Plusieurs stratégies d'atténuation sont associées à chaque scénarios de référence. Les hypothèses de politiques communes, dites « SPA²⁹ », traduisent les effets de plusieurs scénarios politiques (accords de coopération internationale, accords régionaux, couverture du secteur d'utilisation des sols) à travers un ensemble de mesures touchant l'énergie, l'industrie ou l'UTCATF³⁰.

L'architecture en matrices permet alors de décliner différents degrés d'action publique, les efforts à réaliser pour parvenir à des diminutions d'émissions et à des cibles de forçage radiatif en ligne avec les objectifs climatiques (cf. **Figure 9**).

Scénario	Nom	Enjeux atténuation/adaptation	Description
SSP1	Sustainability <i>Taking the Green Road</i>	Faibles	Forte coopération internationale, donnant la priorité au développement durable
SSP2	Middle of the Road	Moyens	Poursuite des tendances historiques
SSP3	Regional Rivalry <i>A Rocky Road</i>	Elevés	Monde fragmenté affecté par la compétition entre pays, une croissance économique lente, des politiques orientées vers la sécurité et la production industrielle et peu soucieuses de l'environnement
SSP4	Inequality <i>A Road Divided</i>	Faibles/Elevés	Grandes inégalités entre pays et en leur sein
SSP5	Fossil-fueled Development <i>Taking the Highway</i>	Elevés/Faibles	Développement traditionnel et rapide des pays en voie de développement, fondé sur une forte consommation d'énergie et des technologies émettrices de carbone

Figure 8 : Description des scénarios SSP et de leur narratif

Source : Riahi et al. (2017), *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview*.

²⁸ Shared Socioeconomic Pathways.

²⁹ Shared Policy Assumptions.

³⁰ Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie.

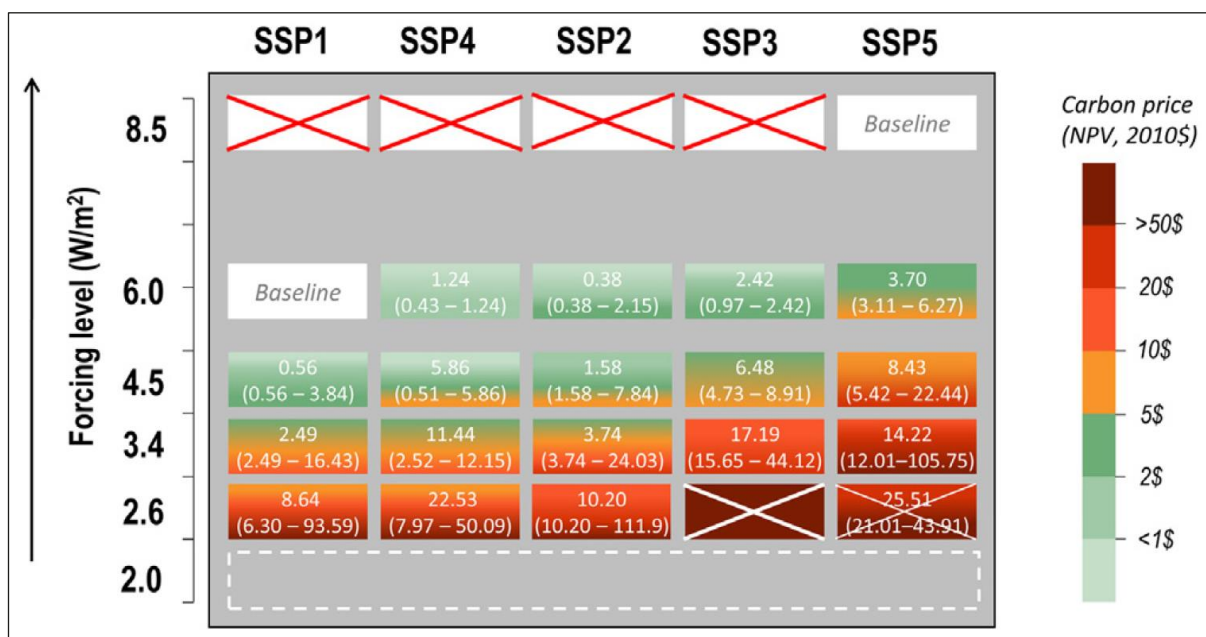


Figure 9: Atteignabilité des cibles de forçage radiatif (RCP) parmi les scénarios SSP

Source: Riahi et al. (2017), *The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview*.

Note: en blanc, les scénarios baseline; les cases vides représentent une absence d'atteignabilité; les couleurs représentent le niveau de prix du carbone du scénario marqueur (entre parenthèses, le panel de valeur des scénarios). Les colonnes sont ordonnées selon les enjeux croissants d'atténuation: faibles enjeux (SSP1/SSP4), enjeux intermédiaires (SSP2), enjeux importants (SSP3/SSP5).

3.2. Les méthodes narratives pour développer des scénarios climatiques

Plusieurs méthodes narratives peuvent être mises en application pour représenter un scénario climatique applicable à un stress-test :

- Dans l'approche prospective (ou normative), la trajectoire est définie à partir d'une cible prédéfinie à une date future (par exemple, une cible de température ou d'émissions); la trajectoire est une déclinaison d'hypothèses exogènes permettant d'atteindre cet objectif (ex: scénarios GIEC de la communauté internationale, scénarios de référence de haut niveau du NGFS, scénario « *Sustainable Development* » de l'AIE).
- L'approche énumérative vise à décliner précisément et de manière exhaustive l'ensemble des mesures politiques existantes ou annoncées et les impacts socio-économiques associées, à travers les lois budgétaires, les programmes pluriannuels ou les stratégies de long terme; en particulier, une telle approche nécessite de faire une distinction fine entre les mesures selon leur crédibilité et le réalisme de leur implémentation (ex: « *Stated Policies Scenario* » de l'AIE) et pourrait le cas échéant être utilisée comme scénario de référence.
- L'approche historique vise à reproduire le plus fidèlement un choc économique passé; les économistes manquent toutefois de recul sur les effets déjà matérialisés du changement climatique, bien que certaines expériences puissent déjà être évaluées.
- L'approche hypothétique vise à implémenter un ou plusieurs chocs sévères, sans *a priori* sur leur probabilité d'occurrence.

Ces approches diffèrent selon la connaissance en amont du scénario et sur le déterminant du narratif (cf. **Tableau 13** et **Figure 10**)

		Connaissance <i>a priori</i> du scénario	
		Scénario inconnu	Scénario connu
Déterminant du narratif	à partir du facteur de risque	<i>Hypothétique</i>	<i>Enumératif</i>
	à partir d'une cible prédéfinie	<i>Prospectif</i>	<i>Historique</i>

Tableau 13 : Classes des approches narratives selon leur déterminant et la connaissance en amont du scénario

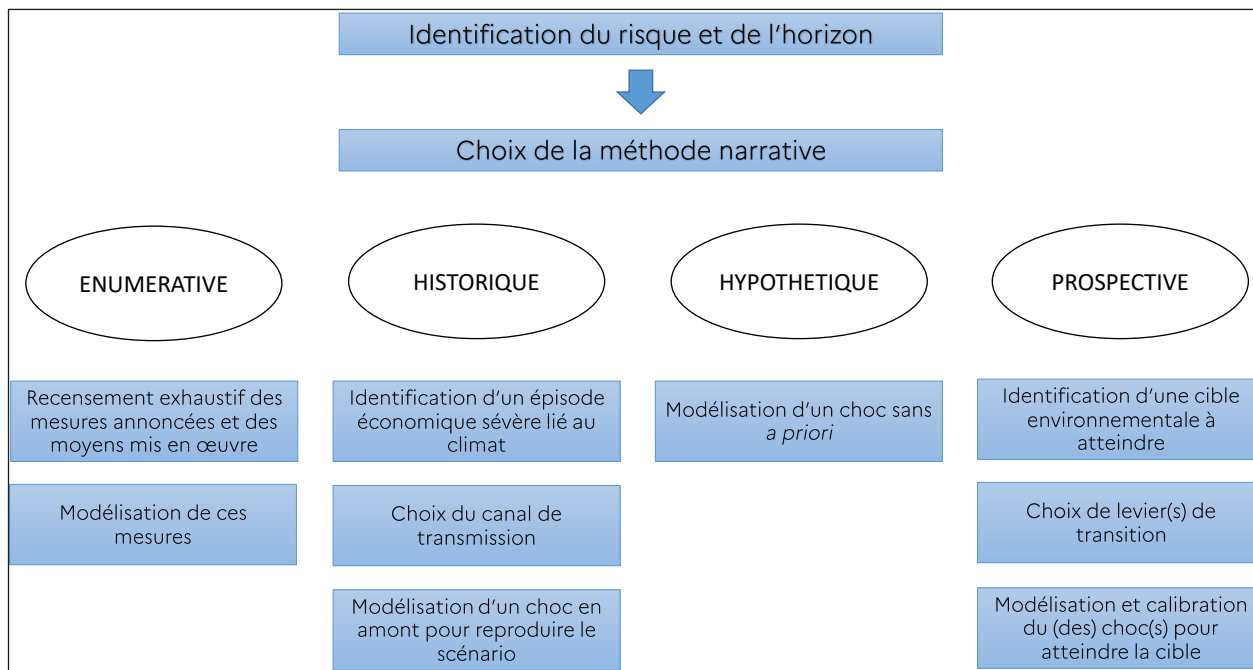


Figure 10 : Décliné de l'approche narrative d'un stress-test climatique

Source : auteur.

3.3. Les scénarios climatiques des institutions internationales et leurs limites

Les scénarios sont supposés reposer sur des narratifs qui explicitent clairement comment le scénario intègre l'ensemble des risques à évaluer. Dans le cas d'un stress-test, les scénarios doivent être « sévères tout en demeurant plausibles ». C'est pourquoi l'utilisation d'expériences passées, en particulier de crises économiques et financières, est un apport fondamental des stress-tests, car elle apporte une métrique réaliste à de futurs états sévères de l'économie, au contraire de scénarios plus exploratoires dont le narratif peut parfois sembler moins réaliste (cf. **Encadré 2**).

Dans le cas des risques climatiques, les narratifs font l'objet d'une difficulté supplémentaire de modélisation liée à une *incertitude radicale* et au manque d'informations historiques. La documentation des impacts financiers ne couvre pas l'intégralité des risques identifiés, et ce malgré le début de la matérialisation des risques physiques (ACPR, 2019). Les diverses projections scientifiques maintiennent une grande incertitude sur le changement climatique : ampleur et vitesse du réchauffement, diversité et incertitudes des impacts sur l'ensemble des paramètres physiques et environnementaux. Selon les recensements faits par la Direction générale du Trésor, le changement climatique pourrait, en l'absence de politique volontariste de baisse des émissions, diminuer le PIB mondial d'une valeur comprise entre 4 et 30 % d'ici à 2100 (Lancesseur, Labrousse, Valdenaire, & Nakaa, 2020). Enfin, les effets économiques du changement climatique restent soumis à une forte incertitude, notamment sur les vecteurs de transmission des phénomènes physiques aux systèmes socio-économiques ainsi que sur les actions publiques attendues d'atténuation et d'adaptation à ce changement. C'est pourquoi l'analyse par scénario est par définition limitée dans l'évaluation de ces risques, dans la mesure où les événements sont

Encadré 2 : Déclinaison d'un scénario de stress-test de solvabilité

La mise en œuvre de stress-tests de solvabilité³¹ peut être analysée selon plusieurs grilles de lecture :

(i) Le type d'analyse

Le terme « stress-test » regroupe un large spectre de techniques de modélisation, classées en deux types de programmes. Les **tests de sensibilité** constituent le niveau basique d'un programme de stress-test et regroupent les processus qui visent à déterminer l'impact d'un unique facteur de risque sur l'établissement et son portefeuille (ou un actif donné). Ils sont souvent sans relation directe avec un contexte économique ou financier global³². Ils nécessitent peu de ressources, sont simples à mettre en œuvre et permettent d'identifier rapidement les principaux risques d'un portefeuille³³. Les **analyses par scénarios** évaluent l'impact d'un ensemble de facteurs de risques sur un portefeuille financier et décrivent un état dynamique et prospectif du reste de l'économie. Ils représentent l'évolution d'un ou plusieurs paramètres simultanés en incluant les potentiels effets d'entraînement liés aux boucles de rétroaction de l'économie, et sur des horizons de temps plus étendus (de quelques mois à deux ans).

(ii) Le narratif du scénario

Les événements simulés lors de l'exercice reposent le plus souvent sur des **scénarios historiques**, qui reproduisent des crises économiques ou financières passées. Ils présentent un cadre réaliste et intègrent à la fois la probabilité d'occurrence du choc, son amplitude et la cohérence globale entre l'évolution des différentes variables en jeu, bien que les chocs attendus puissent être inadéquats et sous-estimer le risque réel à venir. Au contraire, les **scénarios hypothétiques** cherchent à explorer les états potentiels futurs de l'économie. Ils sont plus flexibles et peuvent explorer de nouveaux risques et chocs, notamment au regard des vulnérabilités identifiées par les institutions financières. Les scénarios trop extrêmes ou trop innovants peuvent toutefois être perçus comme peu plausibles par les institutions (BIS, 2009).

(iii) La modélisation statistique

Les **scénarios déterministes** sont définis *a priori* et sans prise en compte de leur probabilité d'occurrence. Ils englobent souvent *a minima* deux scénarios : un scénario central (« *business as usual* » ou « *best estimate* ») et un scénario dégradé (« *downturn scenario* ») représentant le choc économique ou financier. Le stress-test vise alors à mesurer l'impact d'un événement « sévère, mais plausible ». Ces scénarios sont plus simples à implémenter que les **scénarios stochastiques** qui sont générés aléatoirement pour produire une distribution probabiliste pour une ou plusieurs variables-clés. Cette approche requiert des capacités avancées de modélisation et est plutôt limitée aux évaluations internes des risques par des institutions, souvent à des horizons de court terme.

(iv) L'objectif de l'exercice

Les **exercices microprudentiels** sont des exercices de supervision visant à assurer la résilience financière de chaque institution prise isolément. Menés dans un cadre de surveillance globale, les **exercices macroprudentiels** visent à assurer la stabilité du système financier dans son ensemble et prévenir le risque systémique³⁴. Cette approche diffère en deux points importants : l'hypothèse dite de « bilan constant » peut être relâchée et autorise le secteur bancaire du modèle à ajuster son bilan en fonction de l'environnement économique ; enfin, elle évalue les effets de contagion³⁵ dans le secteur financier et la rétroaction entre secteur financier et économie réelle (effets de « second tour ») par exemple à l'aide de modèles macroéconomiques développés avec un bloc financier.

(v) Le niveau de granularité

Dans les **approches « top-down »**, les expositions des institutions financières sont agrégées en des ensembles homogènes et l'impact des scénarios adverses est évalué par le superviseur sans la participation directe des institutions. Au contraire, les **approches « bottom-up »** considèrent les expositions de manière fine et les exercices sont réalisés par les institutions à partir de leurs modèles internes et leurs données granulaires, sous le contrôle du superviseur et à partir de ses scénarios.

³¹ Des stress-tests spécifiques de « liquidité » sont également menés et se concentrent sur le passif des banques.

³² Par exemple, la baisse instantanée d'un taux d'intérêt, sans lien avec un narratif précis.

³³ Les tests de sensibilités sont plus appropriés lorsque les fluctuations d'un portefeuille dépendent d'un seul paramètre de marché.

³⁴ Les risques systémiques sont les risques de menaces à la stabilité financière qui nuisent au fonctionnement d'une grande partie du système financier et ont des effets négatifs importants sur l'économie en général.

³⁵ Les effets de contagion sont directs (expositions croisées des institutions entre elles) ou indirects (expositions corrélées).

imprévisibles au regard du passé et peuvent avoir une magnitude extrême³⁶, et serait nécessairement prospective. De plus, les risques climatiques sont *endogènes*, dans la mesure où la matérialisation du risque dépend de la perception et de la réaction des agents économiques, et doivent donc impliquer un grand nombre de scénarios.

Pour limiter l'incertitude des effets du changement climatique, les superviseurs peuvent s'appuyer sur les scénarios de long terme réalisés par les différentes institutions internationales offrant un cadrage pertinent pour un exercice d'évaluation des risques. Développées par la communauté académique mondiale, les **trajectoires socio-économiques partagées du GIEC** (*Shared Socioeconomic Pathways*) décrivent un ensemble de trajectoires économiques mondiales et régionales, leur articulation avec les trajectoires de concentrations et de température et ainsi les enjeux associés aux politiques d'atténuation et d'adaptation (Riahi, et al., 2017). Les **scénarios WEO** (*World Energy Outlook*) et les **scénarios ETP** (*Energy Technology Perspective*), réalisés par l'Agence internationale de l'Énergie décrivent des projections énergétiques de long terme, s'appuyant sur une revue systématique des politiques implémentées ou à venir et affectant les marchés de l'énergie (IEA, 2020). Ces deux familles de scénarios de long terme, qui font référence pour les différents acteurs au niveau international, présentent l'intérêt d'intégrer à la fois des projections à faible action d'atténuation (ex : Stated Policies Scenario de l'AIE) et des projections à forte action d'atténuation associées à des cibles fixées par des engagements internationaux (ex : Sustainable Development Scenario de l'AIE). Une telle approche permet à la fois de définir les contours d'un scénario de référence et d'évaluer les effets relatifs d'un ou plusieurs chocs sévères de transition d'un scénario à un autre, éléments nécessaires à la mise en œuvre d'un stress-test. A ces visions prospectives internationales, s'ajoutent également des programmes ou plans, réalisés au niveau national ou local, et visant à traduire les engagements sur les émissions en projections macroéconomiques cohérentes. En France, la **Stratégie Nationale Bas Carbone** (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020), traduit les objectifs nationaux en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050, les budgets carbone restants aux grands secteurs économiques ainsi que la trajectoire macroéconomique sous-jacente à ces ambitions.

En particulier, une gamme spécifique de scénarios a été réalisée à des fins de cadrage de stress-tests climatiques : les **scénarios de référence de haut niveau du NGFS** (cf. **Encadré 3** et **Annexe 1**) visent à traduire en termes socio-économiques plusieurs trajectoires économiques selon (i) la mise en œuvre de la transition (ordonnée ou désordonnée) (ii) l'atteinte ou non de plusieurs cibles climatiques en 2050 (respect des 1,5 °C, respect des 2°C, non atteinte de la cible) et (iii) l'arrivée à maturité de technologies de capture et séquestration du carbone. Ces scénarios incluent une modélisation intégrée et croisée des risques de transition et des risques physiques chroniques³⁷, notamment sur la base de modèles macroéconomiques et de modèles de circulation générale utilisés par le GIEC. En particulier, les projections économiques reposent sur la trajectoire centrale des trajectoires socioéconomiques partagées, dite trajectoire SSP2 « *middle-of-the-road* », ce qui garantit leur cohérence et leur comparabilité avec les travaux du GIEC.

L'ensemble de ces scénarios a donc un intérêt évident dans l'application d'un stress-test climatique dans la mesure où ils proposent un ensemble de trajectoires économiques cohérentes et réalistes pour une institution financière. A titre d'exemple, la méthodologie PACTA for Banks permet, à partir des différentes projections de l'AIE, de relier les expositions financières des banques à l'économie réelle, d'évaluer et comparer l'alignement des portefeuilles aux objectifs de l'accord de Paris entre ces scénarios (2DII, 2020). Utilisés tels quels, ils semblent toutefois insuffisants et sous-dimensionnés pour mener à bien un exercice de stress-test microprudentiel, notamment du fait de la spécificité des risques climatiques, et font apparaître plusieurs limites méthodologiques :

- En termes de cohérence ; la plupart de ces scénarios sont prospectifs et conditionnés à l'atteinte d'un objectif climatique ; ils peuvent manquer de réalisme, en ne tenant pas compte de l'intégralité des mesures concrètes et des moyens effectifs, notamment financiers, pour mettre en œuvre cette ambition politique ; à titre d'exemple, l'ADEME note que la trajectoire de la SNBC 2 inclut « des prix fictifs qui ne sont adossées à aucune mesure de politique publique (...) afin d'atteindre les cibles de consommation énergétique de la SNBC 2, notamment pour pallier le gel

³⁶ Les risques climatiques peuvent être qualifiés de « cygnes verts », en regards des cygnes noirs théorisés par le statisticien Nassim Nicholas Taleb (Bolton, Després, Pereira da Silva, Samama, & Svartzman, 2020).

³⁷ Seuls les risques chroniques ont été estimés lors de la Phase I. Les événements extrêmes sont supposés être inclus dans la Phase II.

de la taxe carbone [en 2019]; cette approche représente une approximation qui peut conduire à une estimation optimiste des effets économiques de la transition » (ADEME - G. Callonnec, H. Gouëdard, P. Jolivet, 2020).

- En termes de sévérité; la plupart des modèles et outils retenus pour réaliser de tels objectifs étant calibrés à des fins de planification et de recherche d'une trajectoire économique, politique et sociale optimale pour atteindre un ensemble d'objectifs définis en amont par les économistes. Ils sont essentiellement centrés sur des scénarios de politique publique pensés comme la manière économiquement la plus optimale pour réaliser la transition. Conçus de façon optimale aussi bien sectoriellement et géographiquement, ils définissent un scénario utile au dialogue politique mais peu réaliste pour le pilotage et encore moins pour la mesure des risques. Par exemple, les scénarios SSP considèrent la trajectoire de PIB comme un *driver* des scénarios (voir par exemple la documentation du modèle REMIND³⁸), ce qui ne permet pas d'évaluer précisément le coût macroéconomique d'une action d'atténuation.
- En termes de périmètre; les projections sont en l'état difficilement applicables à des exercices de stress-test (absence de variables financières notamment) et à des exercices climatiques (modélisation assez sommaire des secteurs économiques, bien que certains secteurs comme l'énergie ou l'agriculture puissent être finement représentés). Au niveau de la granularité géographique, ils sont également trop concentrés pour être utilisables lors d'un test de résistance conduit au niveau national (cf. **Tableau 2**) pour l'évaluation des risques physiques et de transition de pays spécifiques.

Modèles	Afrique	Amérique	Asie	Europe	Océanie
GCAM - 32 régions	Afrique du Nord, Afrique du Sud, Afrique de l'Ouest, Afrique de l'Est	Amérique centrale et Caraïbes, Amérique latine (Sud), Amérique latine (Nord), Argentine, Brésil, Canada, Colombie, Etats-Unis, Mexique	Asie centrale, Asie du sud, Asie du sud-est, Chine, Corée du Sud, Inde, Indonésie, Japon, Moyen-Orient, Pakistan, Russie, Taïwan	UE12, UE15, Europe hors UE, Europe hors Schengen, Europe de l'Ouest, Europe de l'Est	Australie et Nouvelle-Zélande
MESSAGE GLOBIOM - 11 régions	Afrique	Amérique latine, Amérique du Nord	Asie du Sud-est, Chine, Inde, MEA, ex-URSS	Europe de l'Ouest, Europe centrale et de l'ouest	OCDE du Pacifique
REMIND MAGPIE - 11 régions	Afrique subsaharienne	Amérique latine, Etats-Unis	Brésil, Chine, Inde, Japon, MEA, Moyen-Orient, Russie, Autres pays d'Asie	Union européenne	

Tableau 14 : Granularité géographique de trois modèles d'évaluation intégrée du GIEC

Source : Documentations techniques de GCAM, MESSAGE GLOBIOM, REMIND.

Note : ces trois modèles ont contribué au développement des trajectoires socioéconomiques partagées du GIEC et ont été retenus pour la synthèse des scénarios de référence de haut niveau du NGFS.

³⁸ Pour reproduire le narratif du scénario SSP, le PIB a été calibré par une procédure itérative des gains de productivité : « To calibrate GDP, which is an endogenous result of the growth engine in REMIND, we calibrate labor productivity parameters in an iterative procedure so as to reproduce the OECD's GDP reference scenarios. » (Luderer, et al., 2015).

Encadré 3 : Cadre analytique du NGFS et scénarios de référence de haut niveau

Afin de partager les bonnes pratiques et aider à identifier, mesurer et atténuer les risques financiers liés au climat, le Réseau pour le verdissement du secteur financier (NGFS) a proposé en 2020 un premier cadre analytique d'analyse par scénarios à destination des superviseurs et banques centrales. Ce guide se veut un premier outil pour accompagner la prise en compte du changement climatique à travers les différentes missions de ses membres (politique microprudentielle et macroprudentielle, prévision macroéconomique, politique monétaire, recherche économique...). En particulier, ce cadre analytique distingue quatre familles de scénarios selon l'ampleur de l'action publique menée (objectifs atteints ou non) et le degré d'incertitude sur la transition (ordonnée ou désordonnée), cf. **Figure 11**.

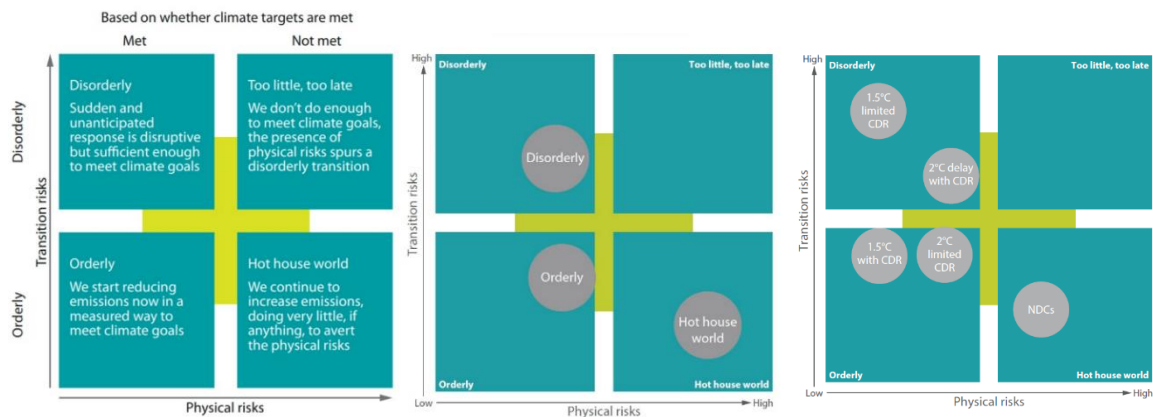


Figure 11 : Matrice du NGFS et articulation entre scénarios représentatifs et scénarios alternatifs

Source : NGFS (2020), NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors.

Un premier ensemble de scénarios quantitatifs a été proposé pour couvrir l'ensemble de ce cadre analytique et projeter un large champ de risques potentiels, en reprenant des hypothèses socio-économiques alignées sur le scénario SSP2 « *middle-of-the-road* » du GIEC (PIB, population, urbanisation, mais aussi progrès technologiques, coopération internationale et utilisation des ressources). Ils se distinguent, selon les quatre axes de la matrice mais aussi selon l'atteinte de cibles climatiques plus ambitieuses et le degré de développement des technologies de capture et séquestration du carbone. A sa phase actuelle de développement, ces scénarios incluent l'impact économique des risques chroniques mais pas ceux des risques aigus.

En l'état, de tels scénarios sont difficilement déclinables à des exercices de test de résistance (notamment du fait de l'absence d'hypothèses macrofinancières et d'un manque de granularité géographique et sectorielle), mais peuvent servir de point d'ancrage pertinent pour le développement de nouveaux scénarios plus fins. Par exemple, dans le cadre de l'exercice-pilote français, l'ACPR retient la trajectoire du prix du carbone comme levier d'action climatique, et aligne les gains de productivité pour reproduire les hypothèses de croissance des scénarios de référence de haut niveau à partir du modèle macroéconométrique NiGEM (voir Allen *et al.*, 2020).

3.4. Comment élaborer des scénarios de stress-test sur le risque de transition ?

Pour élaborer des scénarios de long terme, plusieurs options peuvent être déclinées, à la discrétion des superviseurs, à travers les différentes hypothèses de leviers d'action détaillées (ex : prix du carbone, développements technologiques) et les caractéristiques de la transition. Le NGFS identifie deux déterminants pour ces scénarios :

- La matérialisation de la transition, de manière ordonnée (graduelle, anticipée, continue et efficace) ou désordonnée (soudaine, non anticipée, imprévisible et discontinue); cette transition peut également différer selon les progrès technologiques, le degré de coordination mondiale et l'utilisation des ressources ;

- La matérialisation des risques physiques, selon l'ampleur des mesures d'atténuation mises en œuvre pour réduire les GES, qui conditionne l'atteinte ou non des objectifs climatiques.

Ces scénarios peuvent alors être comparés à un même scénario de référence. Selon le Banque des règlements internationaux, un scénario « *baseline* » d'un stress-test définit un ensemble de conditions financières et économiques cohérentes avec les projections économiques et financières, sans intégration d'un stress spécifique. En pratique, ces projections s'appuient (et prolongent si nécessaires) les principales prévisions macroéconomiques existantes (banques centrales, instituts statistiques et de conjoncture, ministères économiques, *consensus forecasts*, etc.). Lorsque le superviseur est en charge de mener l'exercice de stress-test, il peut alors s'appuyer ou prolonger des prévisions macroéconomiques réalisées par les institutions nationales ou communautaires, généralement sur un horizon d'un à trois ans³⁹. A des horizons de temps relativement courts, ces exercices de prévisions font en général l'objet d'un consensus entre les différents instituts publics et privés en charge de cet exercice.

Dans le cas de scénarios climatiques à moyen et long terme, le choix du scénario de référence est beaucoup plus complexe, dans la mesure de l'incertitude radicale entourant le futur climatique et de l'absence de consensus des marchés et institutions. C'est pourquoi les exercices prospectifs réalisés par les institutions internationales, plutôt que de parler de prévisions, préfèrent parler de projections reflétant un large champ des possibles. De plus, il apparaît que tout scénario central, selon la modélisation et l'horizon retenu, peut *in fine* s'avérer plus adverse que les scénarios adverses retenus. Au regard des premiers exercices exploratoires des superviseurs et de la variété des options testées, il apparaît en premier lieu que ce choix dépend de l'objectif recherché, et en particulier si le superviseur réalise un exercice prospectif ou un exercice spécifique d'évaluation des risques (cf. **Tableau 15**).

Si l'objectif recherche est prospectif

Dans ce cas, la définition explicite d'un scénario de référence apparaît être un élément peu déterminant de l'exercice.

Il apparaît tout d'abord que la définition (ou non) d'un scénario central a un intérêt limité dans la réalisation d'un stress-test climatique, en particulier en l'absence d'exigences en capital réglementaire⁴⁰. A titre d'exemple, la Banque d'Angleterre (2020) ne définit pas explicitement de *baseline*. L'exercice consiste à projeter les pertes selon tous les scénarios et d'observer et comparer un champ des possibles, sans nécessairement mesurer les effets de la matérialisation d'un risque spécifique. Cette approche prospective prend également du sens car elle permet de réaliser des scénarios intégrés de risques physique et de transition cohérents.

Une autre solution pourrait être de se référer aux trajectoires socio-économiques de long terme réalisées par les agences communautaires ou nationales. Ces scénarios tracent en effet plusieurs futurs hypothétiques possibles pour l'économie mondiale. Toutefois, il n'existe aucun scénario ressortant comme plus probable qu'un autre aux yeux de la communauté scientifique ou académique. Une telle approche pourrait reposer sur les hypothèses du « *Stated Policies Scenario* » de l'AIE et inclure les mesures détaillées à venir, ou sur les hypothèses du scénario SSP2 « *middle of the road* » du GIEC, dans lequel la trajectoire économique, sociale et technologique suit les tendances historiques observées. Les scénarios de transition préparés au niveau national et inclus dans les lois énergétiques et environnementales sont également limités pour de tels exercices, à la fois car ils ont pu se traduire *ex post* par un manque d'ambition des décideurs publics ou par l'absence de mesures concrètes affectées aux objectifs annoncés.

³⁹ Par exemple, dans le cadre du stress-test ABE de 2016, le scénario central reprenait les prévisions macroéconomiques de la Commission européenne pour la période 2016-2018.

⁴⁰ Dans le cas d'un stress-test classique, une banque est supposée avoir provisionné, au titre de l'exercice budgétaire en cours, les pertes attendues en l'absence de stress.

Si l'objectif recherché est l'évaluation d'un risque

Dans ce cas, le scénario de référence servirait essentiellement à évaluer la déviation relative d'un scénario adverse et ainsi capturer l'effet spécifique de la matérialisation d'un risque. Ce choix dépend des objectifs des superviseurs dans l'exercice et de la représentation théorique du futur le plus probable ; les risques associés dépendent toutefois fortement des modèles retenus et des choix prospectifs des modélisateurs. L'une des difficultés est alors, en assurant le réalisme des scénarios, de modéliser des trajectoires qui apparaîtront adverses par rapport au contrefactuel, ce qui dépendra du choix des outils de modélisation. Plusieurs options apparaissent au regard des premiers exercices réalisés :

(i) Scénario central d'absence de tous risques

Dans le but d'évaluer spécifiquement les risques cachés et inconnus, un scénario central pourrait refléter l'absence à la fois de risques physiques et risques de transition, ce qui correspondrait à un scénario de « *status quos* » total. Une telle option permettrait de simuler un scénario adverse simplement (par un choc de transition ou un choc physique), mais apparaîtrait peu réaliste, du fait de la nécessaire interdépendance entre risques physiques et risques de transition : une absence de politique d'atténuation se traduirait par des dommages physiques très importants. De plus, même en présence d'une politique publique volontariste, l'ensemble des projections du GIEC prévoient des dommages physiques, ce qui limite les développements méthodologiques d'une telle approche. Elle apparaîtrait toutefois pertinente pour des scénarios de très court terme, où les risques physiques chroniques n'évoluent pas tendanciellement de manière significative.

(ii) Scénario central à politique inchangée intégrant les actions concrètes annoncées

Un scénario de « *status quo* » pourrait également s'interpréter comme un scénario de politique inchangée, bien que les attentes du marché s'orientent plutôt vers une montée en charge de l'action publique (même insuffisante). Dans le domaine de l'évaluation des politiques publiques, la manière traditionnelle d'évaluer l'effet d'un choc externe est de se référer à un contrefactuel dit « à politique inchangée », ce qui se traduirait ici par une politique d'atténuation limitée et un risque physique élevé. Une telle approche ne permettrait toutefois pas d'évaluer correctement les impacts physiques, dans la mesure où le scénario aurait les conséquences climatiques les plus désastreuses ; il pourrait alors être considéré comme un potentiel scénario adverse.

A titre d'exemple, la Banque du Canada (2020) définit un scénario central de « *business as usual* » incluant une absence d'action climatique (en faisant l'hypothèse d'un gel du prix du carbone sur tout l'horizon du stress), associée à une hausse drastique du niveau d'émissions et de la température moyenne. Il repose à court terme sur les projections du FMI (*World Economic Outlook*), à moyen et long terme sur les projections de la Banque Mondiale et des Nations Unies (bien que ces projections n'intègrent pas les dommages économiques du changement climatique).

(iii) Scénario central de transition ordonnée réussie

Afin de cibler spécifiquement la matérialisation d'un risque de transition, le scénario central pourrait représenter une trajectoire de transition ordonnée, définie ici comme une trajectoire économiquement optimale pour respecter les cibles climatiques.

La matrice à quatre familles définie par le NGFS permet par exemple de comparer des scénarios incluant des risques de transition désordonnée (par rapport à une transition ordonnée) et de risque physique (selon que les objectifs climatiques soient atteints ou non). L'exercice-pilote de l'ACPR repose sur un scénario central de transition ordonnée (cohérent avec la SNBC) ; il s'agit d'un contrefactuel pertinent pour mettre en évidence le risque de transition désordonnée car, dans ce contexte, la transition ordonnée correspond au scénario le moins adverse (Allen, et al., 2020).

	Scénario central	Scénario(s) adverse(s)	Méthode de narration
Pays-Bas (2018)	Politiques inchangées	Hausse de taxe carbone Hausse du renouvelable dans le mix Double hausse Baisse de confiance des ménages	Scénarios hypothétiques
FMI - Bahamas (2019)	WEO (octobre 2018)	Ouragan majeur <i>Perfect storm scenario</i> (recession et ouragan)	Scénarios historiques
Angleterre (assurances - 2019)	Moyenne historique des dettes assurantielles	Trois ouragans (Etats-Unis) Tremblement de terre et réplique (Californie) Tremblement de terre et Tsunami (Japon) Tempête et inondation (Royaume-Uni)	Historique Historique Historique Hypothétique
Canada (2020)	Politiques inchangées	<i>National Determined Contributions</i> Transition ordonnée Transition désordonnée	Scénario énumératif (NDC) Scénarios prospectifs
France (2020)	Transition ordonnée	Transitions désordonnée retardée Transition désordonnée soudaine et accélérée	Scénarios prospectifs
FMI - Norvège (2020)	Politiques inchangées	Choc des prix du pétrole	Scénario hypothétique
Angleterre (2021)	Pas de scénario explicite	<i>Business as usual</i> Transition ordonnée Transition désordonnée	Scénarios prospectifs

Tableau 15 : Narratifs et scénarios des premiers exercices climatiques des superviseurs

Source : Publications des banques centrales et superviseurs.

3.5. Comment élaborer des scénarios de stress-test sur le risque physique ?

Comme explicité ci-dessus, il convient par lisibilité de séparer clairement stress-test climatique de transition et stress-test climatique physique, afin de pouvoir évaluer, pour chacune des institutions évaluées, le niveau d'exposition. A ce jour, la plupart des exercices exploratoires (Banque des Pays-Bas, Banque d'Angleterre) se sont concentrées sur le risque de transition ; seule la Banque de France a proposé un unique scénario central de risque physique. Un tel exercice permet directement de mesurer l'impact direct de la trajectoire la plus adverse sous-jacente au scénario RCP 8.5 (sans scénario contrefactuel). Ce scénario reste cohérent avec la famille de scénarios SSP2 « *middle of the road* ».

- (i) Représenter le risque physique sur un horizon de temps comparable à celui du risque de transition (1 à 30 ans)

La projection d'un tel scénario pourrait s'assimiler davantage à un exercice de mesure des impacts macroéconomiques du changement climatique (le scénario central étant un scénario d'absence de risques, bien que celui-ci soit alors irréaliste). Ce choix, réalisé par la Banque de France, est d'autant plus crédible qu'il se matérialise à des horizons de temps assimilables par les institutions et qu'il limite l'incertitude sur la matérialisation des risques physiques, puisque les trajectoires de hausse de température sont relativement proches dans tous les scénarios du GIEC à cet horizon (phénomène d'inertie climatique, voir par exemple la **Figure 18** en annexe). A ce titre, les institutions financières pourront évaluer leur résilience et leurs vulnérabilités directes aux conséquences du changement climatique.

- (ii) Représenter le risque physique à des horizons plus lointains (20 à 80 ans)

Ce choix est davantage en ligne avec les standards d'un stress-test et l'horizon de temps. C'est en effet à cet horizon que le réchauffement adopte des trajectoires différentes et d'autant plus dépendantes des

politiques d'atténuation mises en œuvre dans cet intervalle, et qu'il existe un risque potentiel et sévère à évaluer. Toutefois, l'horizon de matérialisation est relativement distinct de celui des risques de transition et pourrait être l'occasion de réaliser des stress-tests intégrant à la fois risques physiques, risques de transition et leurs évolutions inversement corrélées. Enfin, en plus d'être difficilement articulable avec les horizons de court terme des institutions, un scénario physique sur très longue période combinerait une multitude d'incertitudes qui rendront l'exploitation de ses résultats extrêmement limitée, à la fois à travers :

- l'incertitude liée aux actions d'atténuation mises en œuvre pour atteindre la neutralité carbone,
- la sensibilité climatique, qui matérialise la hausse de température liée à l'évolution des concentrations dans l'atmosphère ;
- les impacts physiques, conséquences de la hausse de température et des variations du climat ;
- un risque de modèle très fort, en particulier sur les deux dernières incertitudes citées.

Dans tous les cas, les risques physiques, dans de tels scénarios de long terme, ont pour l'instant été essentiellement modélisés de manière tendancielle : ils n'incluent pas la survenue de chocs de grande amplitude et non anticipés, principalement restreints aux exercices de court terme.

4. Modélisation macroéconomique d'un stress-test climatique

4.1. Apport d'un modèle macroéconomique

Les modèles macroéconomiques permettent de simuler les effets économiques d'une trajectoire climatique, sous diverses hypothèses (démographiques, technologiques...) à différents niveaux géographiques et sectoriels. Ces modèles ont en effet plusieurs caractéristiques qui les rendent particulièrement adaptés à la méthode de l'analyse par scénario, à la fois dans le cadre de l'étude d'impact d'actions publiques spécifiques (De Williencourt & Jacquetin, 2019) et celui de l'analyse de risques pour les institutions financières (Appeddu, Suarez-Lledo, Licari, & Juan, 2012):

- Ils présentent un cadre dynamique, permettant d'évaluer des impacts à court, moyen et long terme ainsi que des délais et coûts d'ajustement nécessaires à la transition de l'économie.
- Ils reposent sur un cadre comptable cohérent (équilibre ressources-emplois) qui offre une vision claire et lisible de la situation économique et assure la cohérence de l'évolution croisée des variables d'intérêt.
- La plupart des variables sont interdépendantes ce qui permet de prendre en compte les effets de rétroaction (*feedback loops*). L'offre influence la demande qui en retour détermine l'offre. Cela qui permet, pour l'analyse de la transition énergétique, de modéliser les effets rebonds liés à une variation des prix de l'énergie, ou dans le cadre de l'analyse des risques de marché, de modéliser de façon rigoureuse les corrélations croisées entre actifs.

Au contraire, certains travaux prospectifs ont pu reposer sur des analyses en équilibre partiel basée sur des projections de coûts et de prix par secteur suivant l'implémentation d'une fiscalité carbone (BNP Paribas, 2016) afin d'en estimer des projections de perte. Ces approches ont l'avantage de pouvoir intégrer le pouvoir de marché des secteurs, par estimation du *carbon pass-through*⁴¹, mais n'intègrent pas les différents mécanismes d'ajustement économiques (baisse du pouvoir d'achat et de compétitivité, pression salariale à la hausse, évolution de la production) et les effets dynamiques de la transition.

4.2. Classes de modèles mobilisables

Plusieurs familles de modèles peuvent être mobilisés pour simuler les effets économiques des scénarios climatiques⁴². Toutefois, ils nécessitent d'intégrer *a minima* trois dimensions étroitement liées à un tel exercice :

- Une dimension temporelle et dynamique, liée à la fois aux engagements des nations à atteindre des objectifs climatiques dans le cadre des accords internationaux et à la montée en charge des dommages climatiques projetée à très long terme; les stress-tests s'éloignent alors très largement des horizons classiques (1 à 2 ans). Les modèles peuvent, selon l'anticipation et la préparation de l'action publique, supposer une visibilité parfaite ou imparfaite des agents économiques⁴³.
- Une dimension sectorielle, incluant une modélisation spécifique des interactions entre environnement économique et nature; la possibilité d'arbitrage et de synergie entre plusieurs biens et services ou technologies; ainsi que les progrès technologiques, en particulier ceux touchant le secteur énergétique (NGFS, 2019). La transition consiste bien souvent en un transfert d'activité d'un secteur à l'autre. Or ceux-ci n'ont pas la même intensité en main d'œuvre, ni la même propension à exporter ou à importer. Ces variations ont une incidence sur le PIB qui en retour affecte de façon hétérogène les divers secteurs. Le modélisateur doit définir le niveau

⁴¹ Le *pass-through*, généralement rattaché aux effets d'une variation du taux de change, est le phénomène par lequel la hausse du coût d'un bien ou facteur (ici le carbone) affecte les prix dans une économie.

⁴² Le NGFS en fait une liste exhaustive ainsi que de leurs avantages et limites respectives (voir le supplément technique référencé par la suite).

⁴³ Les modèles dits DSGE (*Dynamic Stochastic General Equilibrium*) peuvent notamment, par l'introduction de chocs stochastiques, introduire de l'incertitude et des actions non anticipées par les agents.

optimal de désagrégation du modèle entre secteurs, pour à la fois limiter les biais de prospective et permettre aux acteurs d'interpréter facilement les résultats des scénarios.

- Une dimension internationale, liée à l'activité des institutions testées et à l'exposition des portefeuilles ; les granularités sectorielles et géographiques peuvent alors être combinées, dans la mesure où l'intensité carbone des secteurs peut fortement varier selon les pays (ex : marché de l'électricité en France et en Allemagne).

Historiquement, les modèles IAM (*Integrated Assessment Models*), dédiés à l'étude économique du changement climatique, étaient les candidats privilégiés pour de tels exercices. Ils sont composés d'un module macroéconomique, d'un ou plusieurs modules techniques (énergie et utilisation des sols notamment) et d'un module climatique. La plupart ont toutefois un niveau de désagrégation sectorielle et géographique trop faible, ce qui les rend de fait inapplicables à définir des scénarios de transition et de risque physique fins. La boucle économie-climat, définie successivement par la relation entre concentrations et température (sensibilité climatique) et entre hausse de température et impact économique (fonction de dommages), est soumise à la critique de Pindyck (Pindyck, 2017), qui juge arbitraire la structure de certaines équations et la calibration de certains paramètres sensibles pour les propriétés du modèle : préférence pour le présent, sensibilité climatique, fonction de dommage (Landa Rivera, Malliet, Saussay, & Reynès, 2018). Les propriétés économiques de ces modèles sont extrêmement hétérogènes (cf. **Annexe 1**) : certains ne représentent pas les coûts économiques du changement climatique, comme le modèle REMIND⁴⁴ (qui s'appuie sur le modèle climatique MAGICC⁴⁵ pour traduire les émissions en impact climatique) ; dans d'autres, les trajectoires de PIB sont exogènes (ex : GCAM).

Deux autres catégories de modèle ont également émergé, aussi bien dans le cadre des travaux du NGFS que dans les exercices exploratoires menés par les différentes institutions :

- Les modèles d'équilibre général calculables, dits modèles « CGE » (*Computable General Equilibrium*), qui représentent finement la désagrégation sectorielle et régionale de l'économie, les interconnexions entre secteurs et la résolution d'un ensemble d'équilibres d'offre et de demande à partir d'un système de prix relatifs (marché du travail, marché des biens et services) ; ils représentent le lien entre activités sectorielles et niveaux d'émission (avec souvent une vision fine du secteur énergétique) et permettent d'analyser précisément les scénarios de transition vers une économie décarbonée ; ils doivent cependant intégrer le coût des dommages climatiques (comme le modèle ENV-LINKAGES de l'OCDE) et leur potentielle variation, faute de quoi, les avantages de long terme politiques d'atténuation volontaristes seraient sous-estimés.
- Les modèles macroéconométriques, construits à partir d'un cadre de comptabilité nationale et d'un ensemble d'équations de comportement estimées économétriquement afin de prévoir l'évolution des principaux agrégats (demande, importations, prix et salaires) ; leur dynamique repose sur un ajustement progressif vers un nouvel état d'équilibre et tiennent compte, comme certains CGE, de l'inertie des processus d'ajustement des prix et des quantités ; cependant, ils sont construits et estimés à partir de données passées et sont inefficaces, selon la critique de Lucas⁴⁶, à évaluer proprement l'effet de nouvelles politiques environnementales visant à modifier à long terme la structure et le fonctionnement de l'économie (ex : modèle NiGEM du NIESR⁴⁷) ; à l'instar de la plupart des modèles CGE actuels, ils sont muets sur la question des risques physiques.

Si ces deux familles ont de nombreux points communs (désagrégation, identités comptables), le comportement des agents découle de cadres économiques différents, ce qui a des implications fortes pour l'analyse par scénario : dans les CGE, l'optimisation assure que toutes les ressources sont pleinement utilisées, il n'est alors théoriquement pas possible d'augmenter production et emploi par l'ajout d'une régulation ; au contraire, les modèles macroéconométriques autorisent l'utilisation de capital et travail additionnels et rendent possibles de soutenir davantage l'économie (Cambridge Econometrics, 2019).

⁴⁴ « In contrast to RICE, REMIND does not monetize climate damages, and therefore is not applied to determine a (hypothetical) economically optimal level of climate change mitigation ("cost-benefit mode"), but rather efficient strategies to attain an exogenously prescribed climate target ("cost-effectiveness mode") ».

⁴⁵ Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change.

⁴⁶ Selon Robert Lucas (1976), évaluer les effets de nouvelles politiques publiques nécessite de recourir à des modèles structurels, reposant sur des paramètres robustes et invariants à l'environnement économique : « Given that the structure of an econometric model consists of optimal decision rules of economic agents, and that optimal decision rules vary systematically with changes in the structure of series relevant to the decision maker, it follows that any change in policy will systematically alter the structure of econometric models ».

⁴⁷ National Institute's Global Econometric Model.

Bien qu'une variété très large de modèles ait été appliquée pour mener de telles analyses, il apparaît qu'aucun d'entre eux ne se démarque des autres et permette encore de capturer l'ensemble des caractéristiques propres aux risques climatiques. Ils sont notamment encore utilisés de manière séparée et spécifiquement pour certaines catégories de risques (modèles CGE et modèles macroéconométriques pour risques de transition, modèles IAM pour risques physiques), et sont parfois même associés à des modules complémentaires permettant de préciser les effets détaillés. D'autres familles (modèle entrées-sorties, modèles multi-agents, modèles stock-flux cohérents, modèles à générations imbriquées), moins répandues parmi les acteurs, semblent également complexes à appliquer à des scénarios de stress-tests.

Les modèles a-théoriques et statistiques, soumis à la critique de Lucas, restent peu utilisés pour ce type d'exercices nécessitant une analyse profonde de l'évolution des mécanismes régissant l'économie à long terme ; toutefois, leur apport peut s'avérer pertinent pour des exercices nationaux de très court terme : à titre d'exemple, le FMI a développé un modèle VAR (*Vector Autoregression*) structurel afin d'analyser spécifiquement l'impact en Norvège d'une hausse des prix du carbone sur les revenus pétroliers, le PIB et les pertes bancaires sur portefeuille de prêts sur un horizon de trois ans (Grippa & Mann, 2020).

	Description	Pertinence pour étudier les risques climatiques	Exemples
Modèles IAM	Description des interactions entre environnements socio-économique, technique et climatique	Faible désagrégation sectorielle Dimension internationale et régionale Représentation physique, parfois coût des dommages (émissions, concentration, forçage radiatif, température et dommages)	DICE/RICE (Nordhaus) MESSAGE (IIASA) REMIND-MAGPIE (PIK) WITCH (FEEM)
Modèles CGE	Description de l'économie comme un ensemble de flux monétaires entre agents et secteurs selon les principes de l'équilibre général ⁴⁸ Comportement des agents microfondés issus d'une optimisation sous contrainte	Forte désagrégation sectorielle Dimension internationale et régionale Absence de représentation physique	AIM/CGE (NIES) ENV-LINKAGES (OCDE) EPPA (MIT) G-CUBED (Australian University) GEM-E3 (JRC) GTAP (Purdue University) ImacliM-R (CIRED)
Modèle macro-économétriques	Description de l'économie comme un ensemble de relations entre variables économiques agrégées Comportements projetés par des équations économétriques estimées sur données passées ⁴⁹	Forte désagrégation sectorielle Dimension internationale et régionale Absence de représentation physique Modèles soumis à la critique de Lucas	E3ME (Cambridge Econometrics) NEMESIS (ERASME-Seureco)

Tableau 16 : Modèles applicables à l'évaluation des risques financiers liés au climat

Source : auteur, à partir de NGFS (2019).

Note : Les modèles où le PIB est exogène (ex : GCAM) ne sont pas retenus.

⁴⁸ Chen et al. (2015) explicitent les trois caractéristiques propres à tous les agents d'un modèle CGE typique : (i) *zero-profit conditions* (à l'équilibre, le coût marginal égale le bénéfice marginal), (ii) *market-clearing conditions* (le prix équilibre l'offre et la demande sur tous les marchés) et (iii) *income-balance conditions* (les dépenses de chaque agent sont égales à ses revenus).

⁴⁹ Ces comportements ne sont pas nécessairement optimaux.

A titre d'exemple, le modèle multi-pays NiGEM est retenu à la fois pour l'exercice de la Banque des Pays-Bas et l'exercice-pilote de l'ACPR (cf. **Tableau 17**). Très répandu parmi les acteurs publics et les différentes institutions financières, déjà utilisé par les superviseurs dans le cadre de stress-tests classiques, il a l'avantage de pouvoir fournir des scénarios de transition au niveau mondial, de représenter les impacts au niveau de chaque pays et fait également l'objet du développement d'un bloc énergétique (Kara, 2019). Toutefois, il représente un seul secteur productif et ne permet pas de décliner les effets à un niveau plus granulaire. Cette modélisation *top-down* retenue (c'est-à-dire à partir de chocs macroéconomiques agrégés touchant les secteurs de manière indifférenciée), tendrait à négliger certains aspects propres à la transition énergétique (spécificités sectorielles, transferts d'activité d'un secteur à un autre, incitation aux investissements d'efficacité énergétique et incitation à la sobriété énergétique). C'est pourquoi les économistes introduisent l'évolution des grands agrégats ainsi estimés dans des modèles sectoriels afin de répartir l'effet macroéconomique observé à un niveau plus fin en fonction de l'exposition du secteur aux émissions carbonées, à l'image de l'exercice réalisé par la Banque des Pays-Bas (Vermeulen, et al., 2018) ou de l'exercice-pilote de l'ACPR (Devulder & Lisack, 2020). Cette méthode peut présenter un biais de prospective, puisque l'hétérogénéité des résultats sectoriels n'est pas sans incidence théorique sur l'évolution des agrégats (emploi, balance commerciale, investissement, consommation et PIB).

	Modèle	Granularité sectorielle	Granularité géographique	Instruments de transition	Recyclage des recettes
Pays-Bas (2018)	NiGEM + règle de ventilation sectorielle	56 secteurs	Multi-pays <i>Déclinaison : Pays-Bas</i>	Prix du carbone Productivité Consommation Coût du capital	Absence de recyclage
Canada (2020)	EPPA (CGE)	13 secteurs	18 régions	Prix du carbone	100 % ménages
France (2020)	NiGEM + modèle sectoriel	55 secteurs	Multi-pays <i>Déclinaison : France, UE (hors France), Etats-Unis, reste du monde</i>	Prix du carbone Productivité	100 % ménages (crédit d'impôt sur le revenu)
FMI - Norvège (2020)	VAR structurel	-	-	Revenus pétroliers (via prix du carbone)	-

Tableau 17 : Modèles et hypothèses des premiers exercices des banques centrales et superviseurs

Source : Publications des banques centrales et superviseurs.

Les modèles macroéconomiques d'équilibre général calculables utilisés à des fins d'évaluation de la transition énergétique pourraient avoir un apport important pour établir des stress-tests climatiques. La Banque du Canada s'est par exemple appuyé sur le modèle EPPA (*Emissions Prediction and Policy Analysis*) développé par le MIT, modèle dynamique et récursif multi-pays. En France, les modèles Three-ME⁵⁰ (OFCE-ADEME⁵¹), Imaclim (CIRED⁵²) et Nemesis⁵³ (SEURECO-ERASME⁵⁴) permettent de modéliser précisément des scénarios de transition. Ils reposent sur une granularité sectorielle fine et sur plusieurs fonctions de production, modélisent l'énergie comme un facteur de production à part entière et associent des approches technico-économiques qui rendent compte des caractéristiques particulières de l'énergie comme bien de consommation complémentaire (on parle alors de modèles hybrides). Ils reproduisent également précisément les émissions sectorielles et la fiscalité carbone, ce qui les rend particulièrement adaptés à évaluer les niveaux d'exposition de chaque secteur au risque de transition. Enfin, ils n'intègrent pas encore de modélisation du risque physique, encore limité au champ des modèles IAM. Comme ils ne sont à l'origine pas développés pour des institutions financières, il est difficile d'articuler leurs projections et les différents modules d'un stress-test (Direction Générale du Trésor, 2017), notamment en raison de

⁵⁰ Modèle Macroéconomique Multisectoriel d'Évaluation des politiques Énergétiques et Environnementales.

⁵¹ Observatoire français des conjonctures économiques – Agence de la transition écologique.

⁵² Centre international de recherche sur l'environnement et le développement.

⁵³ *New Econometric Model of Evaluation by Sectoral Interdependency and Supply*.

⁵⁴ SEURECO (Société Européenne d'Économie) est une entreprise au service de l'équipe de recherche ERASME spécialisée dans la modélisation économique.

l'environnement macro-financier d'un stress-test et des variables spécifiques qui en dépendent (par ex : modélisation fine des taux d'intérêt).

Toutefois, ces modèles sont le plus souvent utilisés à partir de la méthode de *backcasting*, qui consiste à synthétiser un scénario cohérent avec une cible définie en amont, comme cela a pu être le cas en France lors de l'estimation de la valeur tutélaire du carbone (France Stratégie, 2019). Les modèles de transition énergétique sont alors spécifiquement calibrés pour trouver une manière optimale de réduire les émissions de CO₂, définir un ensemble de politiques permettant cette réduction et en estimer les coûts et les opportunités (Douillard, Epaulard, & Le Hir, 2016). Il conviendrait, par un travail de recherche approfondi, d'en évaluer la pertinence à des fins spécifiques d'analyse des risques.

Enfin, certains modèles sont conçus spécifiquement pour évaluer l'impact d'une politique au niveau national : c'est le cas du modèle Three-ME, qui reproduit le modèle d'une petite économie ouverte et modélise le reste du monde comme exogène⁵⁵. Dans cette représentation, la demande mondiale et les prix mondiaux ne sont pas influencés par les différents chocs, ce qui est une limite lorsqu'on évalue une action de transition coordonnée au niveau mondial.

4.3. Propriétés d'un modèle appliqué au risque de transition

Comme explicité ci-dessus, il apparaît à ce stade encore difficile d'intégrer l'exhaustivité des risques à travers un seul outil. Peu de modèles semblent posséder les propriétés indispensables à l'évaluation des deux catégories de risques présentés. Pour le risque physique, l'utilisation d'un seul modèle est soumise à une incertitude radicale, venant à la fois de l'incertitude sur les politiques d'atténuation (incertitude de scénarios), une incertitude sur l'évolution du climat (incertitude climatique), les impacts physiques en découlant (incertitude physique) et un risque de modèle pour tout l'exercice, particulièrement présent pour l'évaluation du risque physique (critiques inhérentes aux fonctions de sensibilité climatique et aux fonctions de dommages). Cet axe doit faire l'objet de travaux et recherches approfondies, aussi bien de la part des superviseurs que de la communauté académique. A ce jour, peu de scénarios climatiques ont intégré toutes ces dimensions par un seul outil. Plutôt qu'un scénario macroéconomique, l'ACPR s'est par exemple reposé sur la modélisation de l'impact direct du scénario RCP 8.5 à travers des variables météorologiques et des variables de santé et leur impact sur le passif des assurances.

Au contraire, la modélisation des risques de transition est un domaine particulièrement ouvert à la modélisation macroéconomique et à l'évaluation d'impact des politiques environnementales. Comme explicité plus en amont, plusieurs catégories de modèles semblent déjà en mesure d'appréhender ces risques, et en particulier les modèles d'équilibre général calculable. Ces modèles ont une désagrégation sectorielle particulièrement fine et permettent d'appréhender l'hétérogénéité des politiques de transition selon les secteurs considérés, ainsi que les transferts d'activité d'un secteur à un autre (en termes d'emploi, d'investissement ou d'importations notamment).

(i) La désagrégation sectorielle et régionale

Ces modèles doivent être désagrégés à des niveaux à la fois suffisamment fins et cohérents pour rendre compte de cette hétérogénéité et à un niveau suffisamment pertinent pour une analyse de risques. Cette désagrégation dépend de la nature et l'importance des risques à évaluer, qui se lisent à la fois dans (i) l'exposition directe à une politique d'atténuation, à travers par exemple l'intensité carbone, (ii) la place dans la chaîne d'approvisionnement économique (et notamment énergétique), (iii) la capacité d'adaptation du secteur à la transition, à la fois dans sa capacité à substituer ses moyens de production carbonés, son pouvoir de marché (sa capacité à répercuter ou non sur les prix les hausses de coûts induites par les mesures de politique environnementale, notamment dans un contexte de forte concurrence internationale), voire même les possibilités de modifier la composition ou les modalités de production de ses biens et services.

Il apparaît donc nécessaire de préciser les critères de la désagrégation sectorielle sous-jacente au modèle, afin d'identifier les canaux de diffusion des risques de transition sur les différentes valeurs macroéconomiques et sectorielles. Utilisé à des fins d'évaluation des politiques énergétiques et

55

environnementales, le modèle Three-ME (Reynès, Yeddir-Tamsamani, & Callonnec, 2011) définit un ensemble de quatre critères privilégiés dans le choix de la désagrégation :

- l'intensité énergétique relative du secteur, qui permet de distinguer les secteurs selon le poids de leur consommation énergétique carbonée et selon leur participation aux émissions de CO₂ d'origine anthropique⁵⁶ ;
- la possibilité de bénéficier d'une exonération fiscale (totale ou partielle), en particulier dans un cadre d'analyse des risques de transition liée à l'implémentation d'une taxe carbone⁵⁷ ;
- le degré d'ouverture à la concurrence internationale, qui permet d'estimer les effets d'une nouvelle contrainte environnementale sur la compétitivité des secteurs ; dans un cadre d'analyse de risque, ce critère serait d'autant plus pertinent lorsque les scénarios intègrent des politiques de transition non coopératives entre pays et déforment les prix relatifs à l'exportation ;
- l'homogénéité de chaque secteur, qui reste un critère comptable principal pour la décomposition sectorielle.

Enfin, la désagrégation fine des fonctions de production, basée sur le modèle GCES (*Generalized Constant Elasticity of Substitution*) y permet de tenir compte de la capacité propre à chaque secteur à substituer (entre énergies fossiles et énergies vertes, mais également entre énergie et capital) et à s'adapter face à l'adoption de nouvelles contraintes environnementales⁵⁸. Ainsi sont groupées au sein d'un même secteur les activités productives présentant une intensité énergétique et un facteur d'émission de CO₂ semblables, ce qui assure la cohérence globale de la structure de production, distingue les principaux secteurs de la comptabilité nationale selon les nomenclatures d'activités courantes et réduit autant que se peut la taille du modèle en préservant son pouvoir explicatif.

A noter toutefois, comme le souligne l'ACPR (2020), qu'il pourrait être encore plus pertinent de descendre à un niveau plus fin : le niveau de l'entreprise (dans un même secteur, plusieurs entreprises peuvent avoir des niveaux d'émissions très hétérogènes), voire même de la nature de ses investissements. Une telle précision, difficilement envisageable dans le cadre des modèles macroéconomiques classiques, aurait le bénéfice, tout en exposant les risques de transition des institutions, d'encourager les investissements des entreprises d'un secteur émetteur vers des actions et projets en faveur du climat.

(ii) La place de l'énergie

La représentation de l'énergie dans les modèles semble déterminante pour réaliser un scénario de transition, celle-ci étant la source de plus de 90 % des émissions de CO₂ en France et en Europe. La plupart des modèles macroéconomiques n'intègrent pas l'énergie comme un secteur à part entière ; lorsque c'est le cas, il est souvent doté des propriétés d'un bien de consommation ordinaire, dont la demande par les agents évolue plus ou moins proportionnellement à leur revenu et au prix. Comme mis en évidence par Lancaster dans sa nouvelle théorie de la consommation (1966), la demande énergétique ne découlerait pas de son utilité directe, mais plutôt de ses caractéristiques intrinsèques et notamment du service qu'elle fournit lorsque son utilisation est combinée à certains biens en capital (véhicule de transport, logement). Une telle modélisation a plusieurs avantages et permet notamment de relier consommation énergétique et stock de capital, mais aussi d'imposer des règles de saturation sur la base de critères physiques (Landa Rivera, Malliet, Saussay, & Reynès, 2018). Il apparaît alors nécessaire de sous-diviser les secteurs énergétiques selon les types d'énergies et leur caractère renouvelable ou non. Une telle granularité augmente cependant le nombre de paramètres à estimer par les économistes, comme les élasticités de substitution entre facteurs de production, qui sont souvent mal documentées mais dont les valeurs ont une importance cruciale pour les propriétés du modèle.

(iii) Le raffinement macroéconomique et financier propre à un stress-test

Non pensés à l'origine pour réaliser un exercice de stress-test financier, les modèles macroéconomiques doivent faire l'objet d'une attention particulière pour être en mesure de proposer un ensemble de

⁵⁶ Dans le modèle Three-ME, les émissions anthropiques de CO₂ sont issues de la combustion d'énergies fossiles et de processus industriels de décarbonation de produits métalliques non minéraux (dans le secteur de production du verre et de la céramique). Ils sont supposés être proportionnels au volume de consommations intermédiaires utilisés dans le processus.

⁵⁷ En pratique, ces secteurs ont été définis selon les critères des directives européennes sur l'énergie, qui exonèrent de taxe les secteurs énergétiques, les secteurs industriels consommateurs de combustible à double usage, les secteurs de production de biens minéraux non métalliques et les secteurs soumis au Système Européen d'Echanges de Quotas de CO₂ (EU-ETS).

⁵⁸ Cette modélisation dépasse ainsi les restrictions des fonctions de production classiques (CES), qui imposent une même élasticité de substitution entre toutes les paires de facteurs (voir Callonnec *et al.*, 2013).

variables pertinentes et articulables avec les modèles internes des institutions financières (excepté le cadre sectoriel, qui peut faire l'objet d'un travail de développement spécifique des institutions financières, par exemple dans le calcul spécifique de probabilités de défaut infrasectorielles).

A titre d'exemple, est présentée ci-dessous la liste des scénarios et variables soumises aux banques et assurances par l'ACPR lors de l'exercice-pilote français (2020), ainsi que la capacité du modèle Three-ME (OFCE-ADEME) à fournir une information aussi détaillée (cf. **Tableau 18**). Il apparaît alors que la dimension internationale des scénarios et des modèles, en plus de refléter précisément l'hétérogénéité des impacts selon les régions, permet également de décliner des scénarios macro-financiers cohérents et applicables par les acteurs. En effet, de nombreux modèles macroéconomiques français sont dédiés à l'évaluation de politiques économiques nationales et sont ainsi construits sous la forme de « petites économies ouvertes », avec un environnement international supposé exogène ; une telle approche assure la lecture des résultats *toutes choses égales par ailleurs*, mais ne permet pas de définir un narratif pour les principales variables macro-financières dont l'évolution est guidée par les équilibres et déséquilibres sur les marchés mondiaux (taux d'intérêt des titres souverains, taux de change, prix du pétrole, etc.).

Si cette finesse semble indispensable pour des exercices d'évaluation des risques à des horizons lointains (qui prendraient en compte l'ensemble des actions mondiales pour atteindre la neutralité carbone, ou bien les effets tendanciels du changement climatique), des modèles moins détaillés peuvent être considérés pour simuler des chocs violents à horizon court, à l'échelle d'une région ou d'un pays. Par exemple, le FMI retient un modèle VAR pour simuler l'effet à court terme d'une hausse des prix du carbone sur les revenus pétroliers de la Norvège, sur le PIB national puis sur les défauts de prêt, les contreparties étant ainsi supposées être majoritairement localisées au niveau national (Grippa & Mann, 2020). De même, la simulation d'un ouragan dans les îles Bahamas a été réalisée, sur la base d'un scénario historique, à travers un modèle DSGE très agrégé et centré sur l'économie locale (IMF, 2019).

L'exercice étant nouveau pour les institutions financières, les modèles internes ne sont pas encore en mesure d'intégrer complètement les scénarios à des fins d'analyse des risques climatiques ; la liste des variables et leur articulation avec les modèles peut donc faire l'objet d'expansions de scénarios⁵⁹ de la part des institutions ainsi que d'échanges complémentaires et de retours d'expériences entre les superviseurs et les institutions, comme le préconise la Banque d'Angleterre, afin d'identifier les variables essentielles dans le processus de modélisation (Bank of England, 2020).

Variables macrofinancières de l'exercice-pilote de l'ACPR	Présence dans Three-ME	Commentaires
Produit intérieur brut	Oui	
Taux de chômage	Oui	
Taux d'inflation	Oui	
Prix du carbone	Oui	
Prix du baril de pétrole	Non	Exogène
Déficit public	Oui	
Dettes	Oui	
Taux souverains	Non	Pas de modélisation
EIOPA		
Taux longs		
Taux court	Oui	Taux d'intérêt de court terme déterminé par la BCE (règle de Taylor)
Taux de change	Non	Exogène
Valeur ajoutée par secteur (en niveau et en %)	Oui	
Production par secteur (en niveau et en %)	Oui	

Tableau 18 : Raffinement d'un modèle CGE pour un stress-test climatique – cas de l'exercice-pilote français

Source : ACPR (2020), Scénarios et principales hypothèses de l'exercice-pilote climatique.

⁵⁹ Pour une institution financière, l'expansion de scénarios consiste, à partir d'un scénario fourni par le superviseur, à interpoler ou extrapoler des variables additionnelles nécessaires pour estimer les impacts sur les contreparties individuelles.

4.4. Transition énergétique et risques de modèle

La représentation des mécanismes propres à la transition énergétique est complexe, notamment du fait des multiples interactions avec le système économique et du caractère particulier de l'énergie. Trois effets sont souvent évoqués dans des scénarios de transition : la sobriété énergétique (réduction de la consommation énergétique), l'efficacité énergétique (réduction de la quantité d'énergie nécessaire pour répondre à un service énergétique donné) et la substitution d'activités émettrices vers des activités plus durables. Si les modèles macroéconomiques commencent à intégrer la question de la transition énergétique, ils ne font pas entièrement consensus sur les impacts macroéconomiques attendus des actions de transition (Boitier, et al., 2015), notamment ceux d'une fiscalité environnementale considérée comme l'outil d'action publique le plus efficace pour atteindre la neutralité carbone.

Il existe un relatif consensus entre modélisateurs pour affirmer que la fiscalité environnementale est supposée avoir, toutes choses égales par ailleurs, un impact négatif sur l'activité (cf. **Tableau 19**), via une hausse des coûts de production et une baisse du pouvoir d'achat des ménages. La théorie du double dividende postule qu'elle peut permettre d'atteindre simultanément deux objectifs : un objectif environnemental (réduction des émissions) et un objectif économique⁶⁰ qui compense ou excède le coût initial. Ce bénéfice est réalisé à travers le recyclage des nouvelles ressources budgétaires qui permettent de sortir d'un point d'équilibre sous-optimal. Dans les modèles, la traduction de ces effets est très hétérogène et dépend de nombreuses hypothèses : situation initiale de l'économie (chômage involontaire, distorsions fiscales), modélisation du marché du travail, méthode de recyclage des recettes, taux d'importation des combustibles (cf. **Figure 12**).

en % d'écart au scénario central	Hausse permanente de 10 % des prix des énergies fossiles				Hausse permanente de la taxe carbone de 1% du PIB ex ante			
	3 ans	5 ans	10 ans	LT	3 ans	5 ans	10 ans	LT
Mésange (Trésor)	-0,2	-0,3	-0,3		-0,6	-0,7	-0,7	-0,7
Three-ME - Wage Setting	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-0,8	-0,8	-0,7	-0,9
Three-ME - Phillips Curve	-0,3	-0,3	-0,3	-0,2	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
Némésis (Seureco)	-0,3	-0,3	-0,3	-0,3	-1,2	-1,2	-1,3	-1,3
Imaclim-R (CIRED)	-0,7	-0,6	-0,4	0,0	-2,0	-1,8	-1,2	-0,1

Tableau 19 : Impact sur le PIB français de chocs de transition par des modèles macroéconomiques nationaux

Source : Boitier et al. (2015), *La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques*.

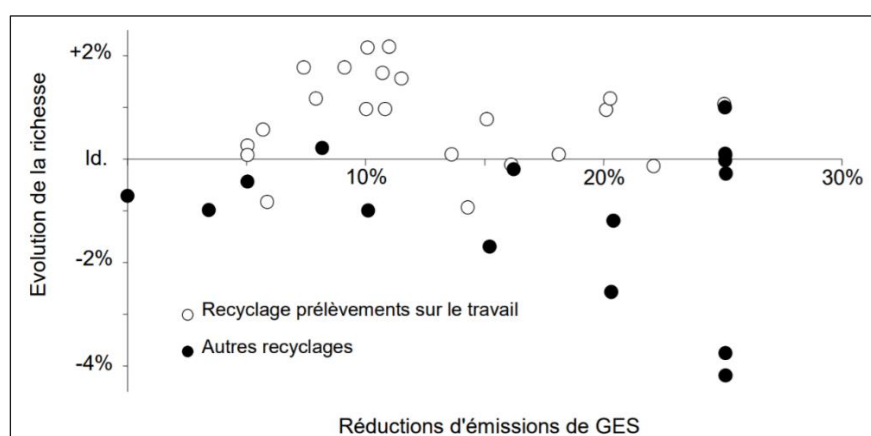


Figure 12 : Hétérogénéité des impacts économique et environnemental de taxes carbone en UE, selon le recyclage

Source : Conseil économique pour le développement durable (2009).

⁶⁰ Selon Ekins (1997), trois types de dividende économique peuvent être distingués : hausse du PIB ou de l'emploi (c'est celui généralement considéré dans les modèles macroéconomiques), mais aussi hausse du bien-être collectif ou baisse des inégalités.

Les modèles peuvent également intégrer à des degrés divers les investissements de transition, qui contribuent à compenser les effets négatifs de l'action fiscale initiale. La fiscalité carbone serait susceptible de déclencher des investissements d'efficacité énergétique⁶¹, devenus rentables par la hausse nouvelle des coûts de l'énergie mais aussi par la résolution potentielle de défaillances de marché préexistantes⁶², tout en limitant la hausse des coûts pour les entreprises (Hebbink, et al., 2018) ; pour peu que l'effet d'éviction entre investissements soit faible, ce qui est le cas dans les modèles qui tiennent compte de la possibilité d'une création monétaire, chez les pays importateurs nets de ressources fossiles, elle permettrait également de réorienter la demande en biens et en investissements vers les producteurs nationaux, en particulier lorsque les modèles font une distinction entre énergies fossiles et énergies vertes (Callonnec & Combaud, 2019). De tels mécanismes restent toutefois soumis à de fortes incertitudes économiques sur laquelle la modélisation ne fait pas consensus : coûts d'ajustement, présence de contrats de long terme, possibilités réelles de solutions de substitution⁶³ ; ils dépendent aussi de la granularité des fonctions de production et de leurs différents intrants (intensité de chaque secteur dans chaque facteur de production, notamment des filières énergétiques, propension à importer et exporter).

Les scénarios macroéconomiques sont également influencés par les éventuels effets multiplicateurs des variations de la demande (liées à l'éventuel recyclage des recettes, mais également aux variations d'emploi ou aux nouveaux investissements de rénovation énergétique). Dans des modèles d'offre d'inspiration néo-classique, où les taux d'intérêt assurent l'équilibre entre épargne et investissement, les évolutions de la demande liées à des actions de transition seraient en partie évincées. Dans des modèles offre-demande d'inspiration néo-keynésienne, l'investissement n'est pas limité par le stock d'épargne, les évolutions du revenu entraînent alors des effets multiplicateurs qui amplifient les effets économiques initiaux.

Enfin, la modélisation du *carbon pass-through* semble également déterminante (cf. **Figure 13**). En réponse à des prix du carbone plus élevés, les entreprises ajustent à la fois leur demande de facteurs et leurs prix. La décision d'absorber tous les coûts sans ajustement (*no pass-through assumption*) pénalise directement les résultats financiers des entreprises et a des conséquences directes sur les portefeuilles d'actifs. Au contraire, une mitigation de ce surcoût sur les prix de vente (absence de comportement de marge) limite les pertes directes mais affecte négativement la demande interne (plus ou moins importante selon le degré d'indexation des salaires au prix) et externe adressée aux entreprises et aurait des effets récessifs à plus long terme. Par exemple, le modèle Three-ME de l'ADEME représente un *carbon pass-through* unitaire à long terme⁶⁴.

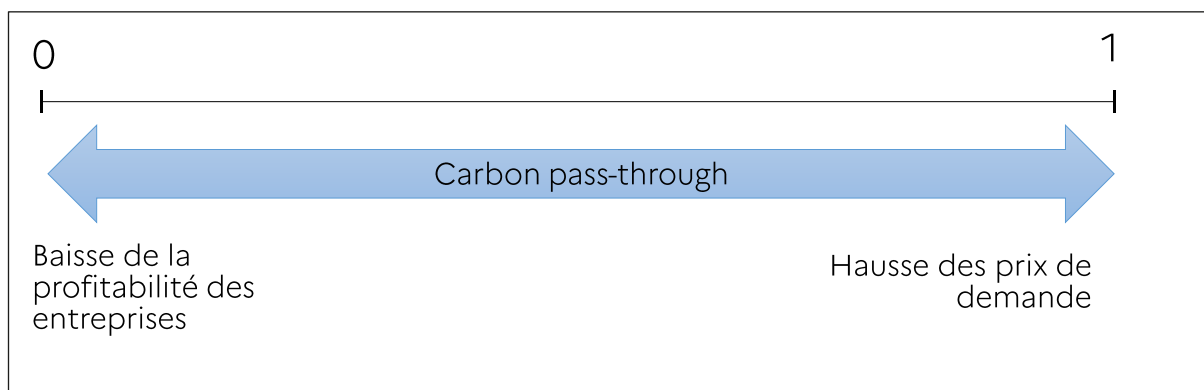


Figure 13 : Carbon pass-through et effets économiques directs

⁶¹ En pratique, les entreprises remplaceraient leurs machines par des équipements plus chers, mais avec une meilleure efficacité énergétique. Du côté des ménages, cela se traduirait par des investissements dans la rénovation énergétique ou par l'achat de véhicules moins polluants.

⁶² Ces défaillances peuvent à la fois venir d'une mauvaise anticipation du prix futur de l'énergie ou d'une myopie des acteurs les empêchant d'évaluer la rentabilité à long terme d'un investissement éventuel.

⁶³ Les paramètres des fonctions de production, comme les élasticités de substitution, sont alors à quantifier très précisément par les modélisateurs, leur valeur pouvant alors fortement influencer des scénarios de transition (voir par exemple Hebbink et al., 2018).

⁶⁴ L'hypothèse de *carbon pass-through* unitaire de long terme est souvent la norme des modèles macroéconométriques et des modèles CGE, qui reposent sur la théorie néo-classique du producteur (maximisation du profit) et sur l'absence de comportement de marge à long terme. La hausse *ex ante* des coûts de production peut seulement être compensée par des substitutions vers d'autres facteurs de production.

4.5. L'apport de la modélisation IAM évaluer les risques physiques

La modélisation économique du changement climatique a historiquement reposé sur les modèles d'évaluation intégrée (IAM), dont la principale propriété est de partir d'une approche pluridisciplinaire pour modéliser les interactions entre économie, technique et climat⁶⁵. Le premier du nom fut le modèle DICE (*Dynamic Integrated model of Climate and the Economy*) développé en 1992 par le lauréat du prix de la Banque de Suède, William Nordhaus. La première génération des IAM regroupait des modèles d'optimisation visant à définir des politiques d'atténuation économiquement et socialement optimale (analyse coûts-bénéfices). La seconde génération, composée de modèles d'évaluation, cherche plutôt à évaluer l'impact de mesures d'atténuation et leur efficacité pour réaliser des objectifs climatiques fixés en amont (analyse coûts-efficacité⁶⁶) ; elle intègre par exemple les modèles utilisés par le GIEC pour réaliser ses trajectoires socio-économiques partagées.

Les modèles IAM présentent des structures très hétérogènes. Cinq caractéristiques apparaissent communes à la première génération (NGFS, 2020) : la trajectoire d'émissions de GES, la température moyenne (*climate sensitivity*), une mesure du bien-être social, une fonction de coût d'abattement des émissions et les coûts économiques du changement climatique (*damage function*). Ils restent toutefois très discutés par la communauté académique, dont les principales objections se retrouvent dans la virulente critique de Pindyck (2017). En particulier, sont jugés arbitraires la structure de certaines équations et la calibration de leurs paramètres, jugés cruciaux sur les propriétés des modèles : la représentation du bien-être et du taux de préférence pour le présent (qui définit la préférence des agents entre les coûts présents de l'action climatique et les conséquences lointaines du réchauffement), la sensibilité climatique (qui fait le lien entre concentrations atmosphériques et élévation de température), et enfin la fonction de dommages⁶⁷ (qui représente le coût économique des dommages climatiques). La seconde génération met entre parenthèses la rétroaction du climat sur l'économie et développe plus explicitement les interactions entre technologies, systèmes physiques (énergie, utilisation des sols) et climat.

Les approches visant à intégrer ensemble l'environnement économique, technique et climatique se sont multipliées, au point que les frontières entre IAM et modèles classiques sont devenues plus floues. Si certains modèles du GIEC considèrent explicitement le PIB comme exogène (ex : GCAM), certains d'entre eux peuvent intégrer un bloc économique à part entière, par exemple sous la forme d'un CGE (ex : AIM/CGE). A l'opposé, certains modèles macroéconomiques ont été progressivement augmentés afin de tenir compte en détail des spécificités physiques et techniques : c'est le cas du modèle EPPA (MIT), CGE dont la dernière version (2015) intègre le système énergétique, le secteur de l'utilisation des sols, l'utilisation des ressources naturelles ou encore les niveaux d'émissions à un niveau granulaire fin, ou encore du modèle macroéconométrique E3ME (Cambridge Econometrics).

L'étude du changement climatique encourage à poursuivre le développement des modèles macroéconomiques par des approches d'évaluation intégrée, par exemple pour intégrer le coût économique du changement climatique de manière *bottom-up* : perte de productivité du travail, diminution des rendements agricoles, destruction de capital... Une telle modélisation permettrait la synthèse de scénarios climatiques combinant risques de transition et risques physiques d'une manière cohérente et détaillée en explicitant précisément les canaux de transmission aux niveaux granulaires pertinents, en lien avec les hypothèses technologiques et les actions d'atténuation mises en œuvre.

⁶⁵ Voir par exemple l'une des premières définitions de l'évaluation intégrée par des experts du GIEC (1996) : « *Assessment is integrated when it draws on a broader set of knowledge domains that are represented in the research product of a single discipline. Assessment is distinguished from disciplinary research by its purpose: To inform policy and decision making, rather than advance knowledge for its intrinsic value* » (Weyant et al., 1996).

⁶⁶ Ces deux approches peuvent se recouper : des modèles d'optimisation peuvent être utilisés pour réaliser des projections, tandis que des modèles d'évaluation peuvent servir à comparer plusieurs actions (Nordhaus & Sztorc, 2013).

⁶⁷ La structure des fonctions (linéaire, quadratique, polynomiale...) conduirait à sous-estimer l'impact des événements extrêmes et des points de basculement qui augmenteraient significativement en cas de hausse de la température (Weitzman, 2011).

5. Conclusion

Les initiatives des banques centrales et des superviseurs pour lutter contre le changement climatique ont ouvert un nouveau champ à la recherche économique et à l'intégration de l'analyse par scénarios prospectifs dans les outils de supervision, champ jusque-là plutôt réservé au domaine des politiques publiques et des prospectivistes. Le recensement des méthodologies et des outils a souligné plusieurs dimensions supplémentaires qu'ont de tels exercices par rapport aux stress-tests classiques :

- la dimension internationale et partagée des risques du changement climatique et des engagements pris pour des actions de décarbonation collective et coordonnée ;
- la dimension sectorielle, liée à la dépendance hétérogène des entreprises et des secteurs aux émissions de gaz à effet de serre, ainsi qu'à des secteurs particulièrement exposés au changement climatique (agriculture) ;
- la matérialité éloignée des événements, qui suppose de projeter des scénarios à des horizons de temps plus lointains que ceux d'un stress-test classique ;
- l'incertitude radicale autour des risques, à la fois en termes de mise en œuvre des actions futures d'atténuation, d'évolution climatique et de matérialisation des dommages physiques sur l'économie, qui limitent l'utilisation de scénarios historiques ; mais aussi sur la capacité des modèles à représenter tous ces événements ;
- l'amplitude extrême des risques (« *fat tail risks*») liée aux non-linéarités, effets dominos, boucles de rétroaction positive et points de basculement, limitant les approches usuelles des stress-tests par des scénarios historiques ;
- l'interdépendance des événements, une hausse (baisse) des actions de décarbonation se matérialisant dans le futur par des dommages climatiques et physiques plus faibles (resp. forts) ;
- enfin, des acteurs économiques et financiers peuvent se révéler gagnants, du fait de l'émergence de secteurs et d'activités à faible impact environnemental (secteur des renouvelables).

Les modélisateurs macroéconomiques font donc face à une ensemble de difficultés pratiques et théoriques. En conclusion de ce référencement non exhaustif, l'ADEME propose une première vision de ce à quoi pourrait s'apparenter un scénario de stress-test climatique, selon les différents objectifs des superviseurs qui se sont avérés de natures et d'horizons très différents (cf. **Tableau 20**). Les exercices prospectifs de très long terme, semblables à ceux de la Banque d'Angleterre, permettent d'assurer une cohérence entre risques physiques et risques de transition mais ne permettent pas d'évaluer précisément l'impact de l'émergence d'un risque par rapport à un autre. Les dernières générations de modèles IAM permettent de réaliser de tels scénarios, comme le modèle ACCL de la Banque de France qui endogénéise la croissance de long terme en fonction de l'évolution des prix de l'énergie (Alestra, Cette, Chouard, & Lecat, 2020). De tels outils permettent de comparer coûts et bénéfices à long terme mais restent soumis à une incertitude radicale et à un manque de détail granulaire.

Au contraire, des exercices de moyen et long terme, centrés sur les horizons de neutralité carbone (2050), permettent de séparer les risques physiques et risques de transition, dans la mesure où les trajectoires de réchauffement sont très similaires dans tous les scénarios futurs et ce indépendamment des actions climatiques à venir (phénomène d'inertie climatique). Ils se rapprochent davantage des caractéristiques d'un stress-test, mais restent sujets à de nombreuses incertitudes. En particulier, l'hypothèse de bilan dynamique, qui semble indispensable pour la cohérence de l'exercice, et la difficulté à définir clairement des scénarios plus probables, semblent être des limites fortes à l'application de nouvelles exigences réglementaires.

D'éventuelles exigences en capital réglementaire pourraient être associés à des exercices de très court terme, qui reflèteraient la matérialisation abrupte d'un événement climatique ou d'une action publique soudaine et non anticipée, en réaction à la matérialisation d'un nouvel événement ou à une pression de l'opinion publique, mais ceux-ci nécessiteraient un travail approfondi de recherche d'expériences et de données historiques pertinentes pour simuler au mieux les futurs risques attendus.

	Exercice prospectif	Exercice d'évaluation des risques		Exercice prudentiel	
Horizon	~2100	~2050		3 à 5 ans	
Risques	Transition et physiques	Transition et/ou physiques		Transition	Physiques
Analyse des risques (élément déclencheur)	Politiques d'atténuation mises en œuvre	Politiques d'atténuation mises en œuvre	Trajectoire RCP 8.5 tendancielle	Action climatique suite à la matérialisation d'un risque	Catastrophe naturelle
Mécanismes en jeu	Arbitrage inter-temporel entre action climatique anticipée et dommages futurs	Evaluation des risques et opportunités d'un ou plusieurs scénarios de transition et des mécanismes d'ajustement de l'économie		Conséquences directes d'un levier environnemental, sans ajustement de l'économie	Conséquences économiques d'une catastrophe naturelle
Choix du scénario central	Pas de scénario central indiqué	Scénario énumératif	Absence de risque physique	Politique inchangée	Absence d'évènement climatique
Choix des scénarios adverses	Scénarios prospectifs reflétant la matérialisation des politiques climatiques et les ambitions annoncées	Scénarios prospectifs reflétant la matérialisation des politiques climatiques et les ambitions annoncées	Scénario tendanciel d'impact climatique et physique (inertie climatique)	Hypothétique ou historique : Action environnementale soudaine	Hypothétique ou historique comme reflétant une catastrophe passée
Choix d'une modélisation	Modélisation sectorielle et géographique intégrant : - la dépendance aux énergies et les niveaux d'émissions - les coûts du changement climatique	Modélisation sectorielle fine intégrant la dépendance aux énergies et les niveaux d'émissions	Scénario climatique et physique Scénario économique intégrant les coûts du changement climatique	Modélisation statistique ou macroéconomique	
Modèles applicables	IAM	CGE	IAM ou assimilé Scénarios physiques hors modèles	VAR Modèle macroéconométrique DSGE/CGE	
Niveau d'incertitude	Scénarios (radicale), modèle (radicale)	Scénarios (modérée), modèle (modérée)	Modèle (radicale)	Scénarios (modérée), modèle (faible)	
Modélisation du bilan	Dynamique	Statique et/ou dynamique		Statique	
Exigences en capital réglementaire	Non	Non		Oui	

Tableau 20 : Les objectifs affichés d'un scénario climatique, selon l'horizon considéré

Source : auteur.

Annexe 1 : Vue d'ensemble des différents scénarios socio-économiques réalisés par les institutions internationales

a) Les trajectoires socioéconomiques partagées (GIEC)

Les scénarios socio-économiques décrivent des trajectoires⁶⁸ potentielles sur le développement économique futur et ses conséquences pour l'environnement. Lors des différents rapports du GIEC (1990, 1995, 2001, 2007, 2014), ces scénarios étaient élaborés en lien avec deux autres catégories de scénarios dont les hypothèses, données d'entrée et conditions aux limites sont interdépendantes :

- les scénarios de changement climatiques, qui projettent les possibles conséquences des activités humaines sur le système climatique, à travers notamment des trajectoires de concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ;
- les scénarios d'impacts climatiques, qui projettent les possibles conséquences de l'évolution du climat sur un système donné (par exemple, la température, le niveau de la mer, le niveau de précipitations...).



Figure 14 : Les trois catégories de scénarios réalisés par le GIEC

Source : IACE (2020), *Comprendre les scénarios de transition – Huit étapes pour lire et interpréter ces scénarios*

Dans le cadre de ses rapports d'évaluation, le GIEC élabore depuis 1988 (premier rapport) un ensemble de scénarios, évaluant un faisceau de « futurs possibles » pour un ensemble de déterminants. Lors du 4^{ème} rapport (2007), ces scénarios étaient élaborés suivant une logique séquentielle qui mobilisait successivement trois groupes de travail :

- A partir d'un ensemble de déterminants socio-économiques, le groupe III du GIEC (en charge des études sur l'atténuation du changement climatique) proposait des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre ;
- A partir de ces émissions, le groupe I du GIEC (en charge des éléments scientifiques de physique du climat) projetait des évolutions climatiques mondiales ou régionales ;

⁶⁸ Le terme scénario renvoie à une description compréhensive du futur du système climatique, incluant des informations qualitatives et quantitatives. Le terme « trajectoire » décrit la composition du scénario, comme la concentration atmosphérique ou les évolutions socio-économiques (macroéconomie, technologie, démographie).

- Le groupe II (en charge des conséquences, de l'adaptation et de la vulnérabilité au changement climatique) utilisaient enfin des modèles pour simuler les effets du changement climatique.

Pour les deux premiers rapports du GIEC 2000g, 4 grandes familles de scénarios⁶⁹ étaient élaborés (A1, B1, A2, B2). Toutefois, depuis les années 2000, cette famille de scénarios ne semblait plus au point pour évaluer les trajectoires socio-économiques. Les raisons sont multidisciplinaires et sont par exemple détaillées par Moss (2010) ou par Guivarch et Rozenberg (2013) :

- évolution des déterminants socio-économiques (croissance des pays émergents, révision à la baisse des projections démographiques);
- pas d'inclusion de politiques climatiques ;
- évolution des modèles physiques pour le climat (puissance de calcul et de résolution) et besoin d'informations plus détaillées et plus fines au niveau des sources d'émissions (ex : aérosols) et de la géographie (ex : usage des sols);
- manque d'éléments nécessaire aux études d'impact et d'adaptation(ex : dynamiques d'urbanisation, évolution des modes de gouvernance);
- le recouvrement des modèles s'étant accru, nécessité d'une coordination renforcée à des fins de cohérence et d'harmonisation entre l'ensemble des modélisateurs (hypothèses, données, conditions aux limites).

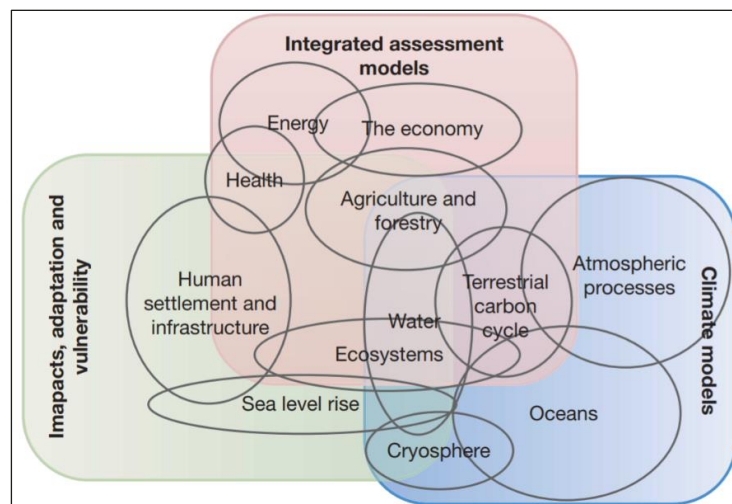


Figure 15 : Interactions entre économie, climat et environnement

Source : Moss et al. (2010), *The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment*, Nature Vol. 463.

En 2006, le GIEC décide de laisser à la communauté scientifique le développement des scénarios économiques, et, à partir du cinquième rapport (2013), d'une nouvelle génération de scénarios pour analyser l'ensemble des mécanismes qui contribuent à l'évolution du climat. Le GIEC y a défini quatre scénarios de référence, les scénarios dits « RCP » (*Representative Concentration Pathways*⁷⁰), représentant chacun des profils d'évolution possibles des concentrations de gaz à effet de serre (GES) suivant l'évolution du forçage radiatif⁷¹ sur la période de 2006 à 2100. En parallèle à ce travail, cinq scénarios de développements socio-économiques sont réalisés par les économistes, les scénarios dits « SSP » (*Shared Socioeconomic Pathways*⁷²), à partir d'une architecture dite « en matrices » qui traduit les moyens à mettre en œuvre, au niveau mondial, pour atteindre les différentes cibles de concentrations définies dans les RCP. Un tel processus permet, en découplant les scénarios climatiques des scénarios économiques, un travail en parallèle et en cohérence des climatologues et des économistes pour analyser les impacts et les coûts de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique. Certaines classes de scénarios sont alors associées, lorsqu'elles sont compatibles, avec des profils d'émissions RCP.

⁶⁹ Ces quatre scénarios dits « SRES » se distinguaient selon le rythme de la mondialisation (axe 1) et la poursuite d'objectifs plutôt économiques ou environnementaux (axe 2).

⁷⁰ Profil représentatif d'évolution des concentrations.

⁷¹ Le forçage radiatif est le changement du bilan radiatif (rayonnement descendant moins rayonnement ascendant) au sommet de la troposphère lié aux facteurs d'évolution du climat, dont la concentration des gaz à effet de serre.

⁷² Trajectoire socioéconomique partagée.

Ces modèles étaient appliqués selon trois étapes successives :

- traduction des narratifs en un ensemble de « tables d'entrée » (ex : disponibilité des ressources, développements technologiques, évolution des modes de vie...);
- traduction des narratifs en projections des hypothèses socio-économiques (notamment activité économique, population et urbanisation);
- utilisation d'une combinaison de modèles IAM pour mettre en cohérence tables d'entrée et narratifs, et en déduire les projections d'énergie, d'utilisation des sols et d'émissions associées.

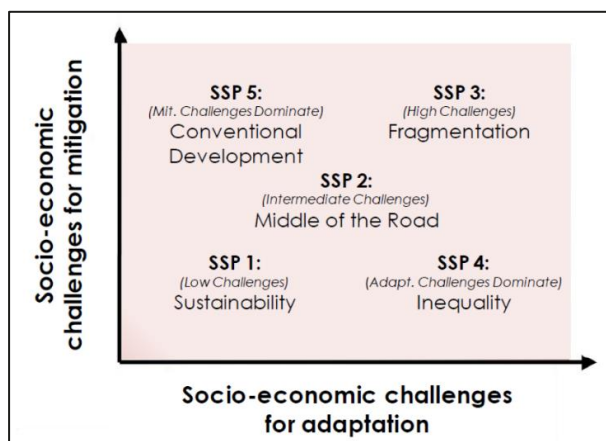


Figure 16 : Trajectoires socio-économiques partagées selon les enjeux d'atténuation et d'adaptation

Source : Direction générale de l'Énergie et du Climat (2013)

Modèle	Institution	Marqueur	Couverture des scénarios	Catégorie de modèles
AIM/CGE ⁷³	NIES ⁷⁴	SSP3	SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5 (22 scénarios)	Equilibre général
GCAM ⁷⁵	PNNL ⁷⁶	SSP4	SSP1, SSP2, SSP3, SSP4 (20 scénarios)	Equilibre partiel
IMAGE ⁷⁷	PBL ⁷⁸	SSP1	SSP1, SSP2, SSP3 (13 scénarios)	Hybride
MESSAGE-GLOBIOM ⁷⁹	IIASA ⁸⁰	SSP2	SSP1, SSP2, SSP3 (13 scénarios)	Hybride
REMIND-MAgPIE ⁸¹	PIK ⁸²	SSP5	SSP1, SSP2, SSP5 (14 scénarios)	Equilibre général
WITCH-GLOBIOM ⁸³	FEEM ⁸⁴	-	SSP1, SSP2, SSP3, SSP4, SSP5 (23 scénarios)	Equilibre général

Figure 17 : Modèles IAM utilisés pour la synthèse des trajectoires socio-économiques partagées

Source : Riahi et al. (2017).

⁷³ Asia Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium.

⁷⁴ National Institute for Environmental Studies (NIES), Tsukuba (Japon).

⁷⁵ Global Change Assessment Model.

⁷⁶ Pacific Northwest National Laboratory, Joint Global Change Research Institute at the University of Maryland-College Park (Etats-Unis)

⁷⁷ Integrated Model to Assess the Global Environment

⁷⁸ PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Bilthoven (Pays-Bas)

⁷⁹ Association du modèle énergétique MESSAGE (Model for Energy Supply Systems And their General Environmental) et du modèle d'utilisation des sols GLOBIOM (Global Biosphere Management Model).

⁸⁰ International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg (Autriche).

⁸¹ Association du modèle macroéconomique REMIND (REgional Model of Investment and Development) et du modèle d'agriculture MAgPIE (Model of Agricultural Production and its Impacts on the Environment).

⁸² Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam (Allemagne).

⁸³ Association du modèle WITCH (World Induced Technical Change Hybrid) et du modèle d'utilisation des sols GLOBIOM.

⁸⁴ Fondazione Eni Enrico Mattei, Milan (Italie).

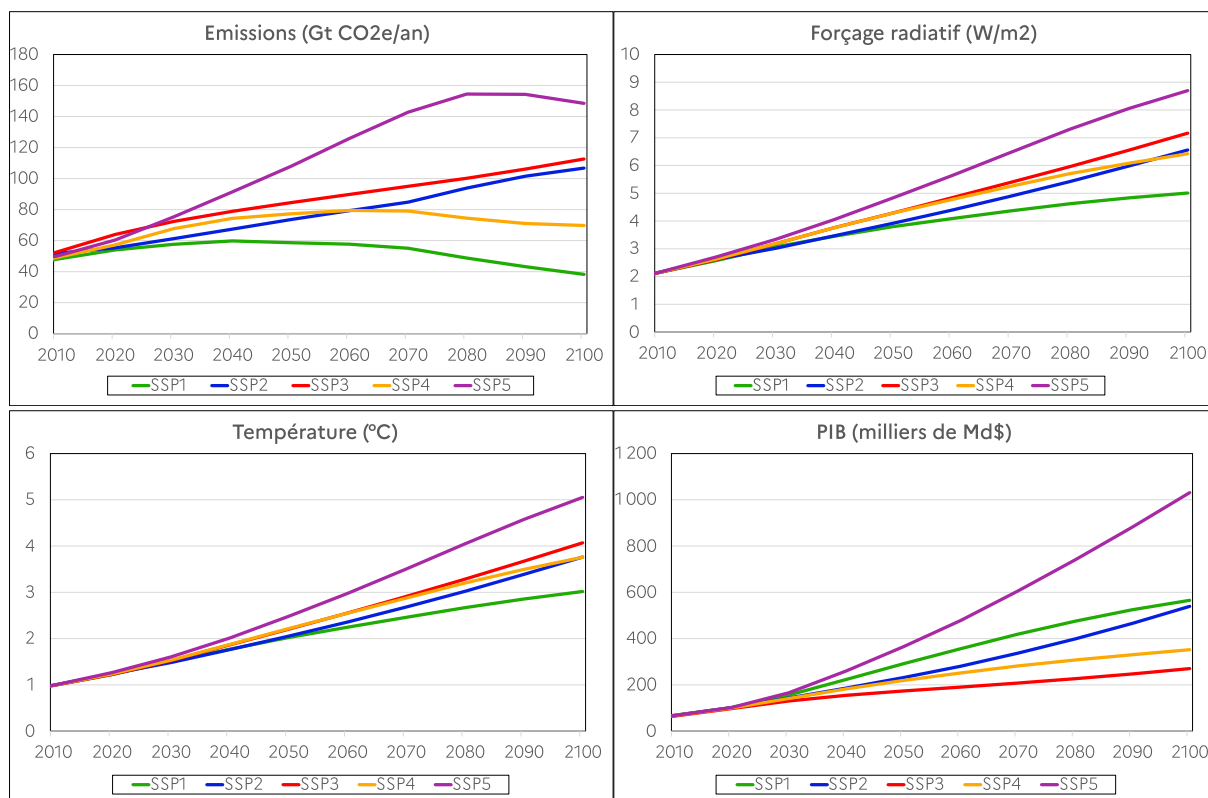


Figure 18 : Trajectoires socio-économiques partagées

Source : Riahi et al. (2017).

Note : Les trajectoires représentent les scénarios mondiaux « baseline » de chaque famille SSP. Les émissions regroupent tous les gaz à effet de serre répertoriés par le protocole de Kyoto, incluent les puits de carbone, et sont exprimés en « équivalent CO₂ », unité permettant de comparer l'impact des différents GES et cumuler leurs émissions respectives. Le forçage radiatif retenu est celui induit par l'ensemble des gaz à effets de serre ainsi que le forçage radiatif, négatif, des aérosols. La hausse de température moyenne est rapportée à la moyenne de la période préindustrielle (1850-1900). Le PIB est exprimé à parité de pouvoir d'achat, en milliards de dollars et à prix constants (année de base : 2005). Chaque trajectoire est associée à son modèle marqueur (cf. Figure 17).

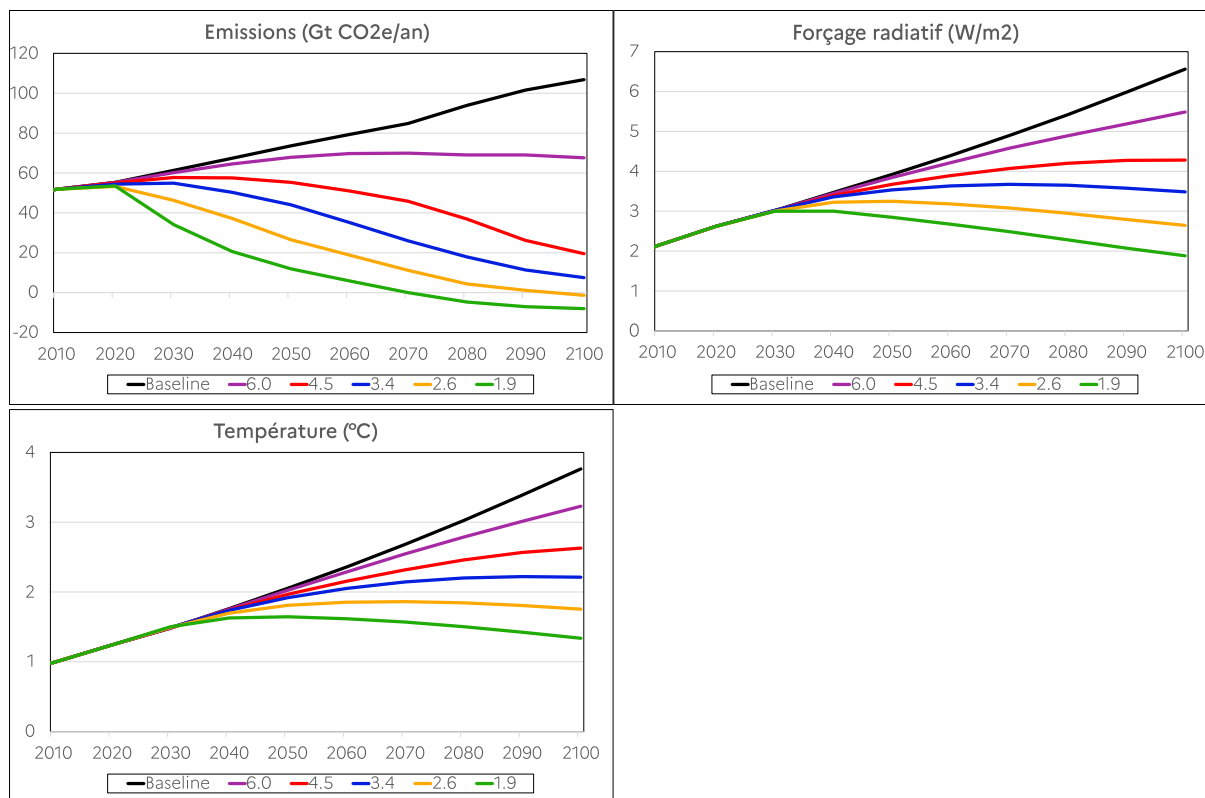


Figure 19 : Déclinaison du scénario SSP2 "middle of the road" selon l'action environnementale

Source : Riahi et al. (2017).

Note : modèle marqueur du scénario « SSP2 » (MESSAGE-GLOBIOM).

b) Les scénarios de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)

L'Agence internationale de l'énergie produit depuis 1993 un ensemble de projections énergétiques. Elles ne représentent pas de prévisions en tant que telles, mais de futurs hypothétiques ainsi que les actions (ou inactions) qui aboutissent à ces futurs et les liens et connexions qui existent entre les différentes variables socio-économiques. Ils reposent sur le modèle WEM (*World Energy Model*) composé de trois modules : la consommation d'énergie finale (consommation résidentielle, services, agriculture, industrie, transport et usages non énergétiques), la transformation d'énergie (production d'électricité et de chaleur, raffinage et autres transformations) et la fourniture d'énergie. Le modèle fournit les trajectoires énergétiques, les besoins d'investissements, les coûts de production, les émissions de CO₂ et les prix à la consommation finale d'énergie. La dernière version du modèle couvre les trajectoires énergétiques jusqu'en 2050 pour 26 régions.

Quatre scénarios sont synthétisés en 2020 :

- Stated Policies Scenario (SPEPS)

Il s'agit du scénario central de l'AIE ; il intègre l'ensemble des mesures et politiques publiques prises jusqu'au jour de sa publication (ainsi que de leurs effets à long terme).

- Delayed Recovery Scenario (DRS)

Ce scénario spécifique a été introduit pour inclure les effets de la crise Covid et ses incertitudes sur l'économie mondiale. Il inclut une crise qui s'étend et un rattrapage économique plus lent que dans le SPEPS. Il inclut les mêmes mesures que celles précisées dans le SPEPS.

- Sustainable Development Scenario (SDS)

Ce scénario traduit une évolution du secteur de l'énergie en lien avec les Objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies⁸⁵ et vise à la fois :

- l'accès universel aux services énergétiques par la population mondiale à horizon 2030 ;
- l'accomplissement des objectifs climatiques internationaux (dont les Accords de Paris) ;
- la réduction des émissions des autres polluants atmosphériques émis par le secteur de l'énergie ;
- pour l'exercice 2020, les politiques de relance verte destinées à soutenir l'économie après la crise Covid.

- « Net Zero Emissions by 2050 » Scenario (NZE2050)

Ce scénario complète le scénario SDS par l'atteinte par les économies avancées de la neutralité carbone à horizon 2050 et par le reste du monde à horizon 2070, et décline les mesures et politiques associées à la réalisation de ces objectifs.

	Stated Policies Scenario (SPEPS)	Sustainable Development Scenario (SDS)	Delayed Recovery Scenario (DRS)
Définitions	Modélisation prudente des politiques existantes, engagements et plans formalisés, incluant ceux nécessitant une adoption formelle	Scénario intégré donnant une trajectoire visant à : assurer l'accès à des services énergétiques durables, modernes, bon marché et sûrs d'ici à 2030, réduire la pollution atmosphérique, mettre en place des mesures effectives pour lutter contre le changement climatique	Scénario dans lequel la pandémie s'allonge et le rattrapage est plus lent que dans le SPEPS
Objectifs	Scénario de référence pour évaluer l'impact et les limites de nouvelles mesures énergétiques et climatiques	Proposer une trajectoire plausible pour permettre l'accès universel à l'énergie, tenir les objectifs de l'Accord de Paris sur le changement climatique et réduire la pollution atmosphérique	Explorer les incertitudes soulevées par la crise Covid-19

Figure 20 : Définitions et objectifs des scénarios du WEO-2020

Source : IEA (2020), World Energy Model Documentation (2020 Version).

c) Les scénarios de référence de haut niveau (NGFS)

Les scénarios climatiques du NGFS ont pour objectif de fournir une base commune pour l'analyse de la diffusion des risques climatiques à l'économie et au secteur financier, à la fois pour les banques centrales et les superviseurs mais aussi pour les institutions financières et le monde académique. Ils ne sont pas présentés comme des prévisions, mais comme un panel suffisamment large d'états futurs potentiels de l'économie.

Ils sont issus d'une première itération par le 2^{ème} groupe de travail sur « les aspects macrofinanciers et l'impact des risques liés au climat sur la stabilité financières », en lien avec le Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), l'University of Maryland (UMD), le Climate Analytics (CA) et le Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ). Trois modèles ont été retenus pour la synthèse des scénarios : GCAM (PNNL), MESSAGE-GLOBIOM (IIASA) et REMIND-MAGPIE (PIK).

Trois scénarios représentatifs ont été réalisés, sur la base d'une distinction entre la mise en œuvre de la transition et l'atteinte des objectifs climatiques⁸⁶ :

⁸⁵ UN Sustainable Development Goals (SDGs)

⁸⁶ Selon ce cadre, un quatrième scénario « too little, too late » combinant à la fois risques physiques et risques de transition aurait pu être inclus mais ne l'a pas été pour la première itération.

- un scénario dit « *business as usual* » (ou « *hothouse world* ») ;
- un scénario de transition ordonnée: action rapide et ambitieuse pour atteindre la neutralité carbone ;
- un scénario de transition désordonnée: action retardée, disruptive, soudaine et non anticipée.

L'incertitude inhérente à la modélisation des scénarios a été prise en compte à travers la déclinaison de cinq scénarios alternatifs, selon les trajectoires de baisse d'émissions ainsi que le déploiement de la technologie de capture et séquestration du carbone (CCS). Un dernier scénario inclut la mise en œuvre par les gouvernements des Contributions déterminées au niveau national (NDC).

Enfin, l'incertitude a également été modélisée à travers l'utilisation conjointe de plusieurs modèles d'évaluation intégrée pour un même scénario ; un seul modèle a toutefois été retenu comme « modèle marqueur » (cf. **Figure 21**).

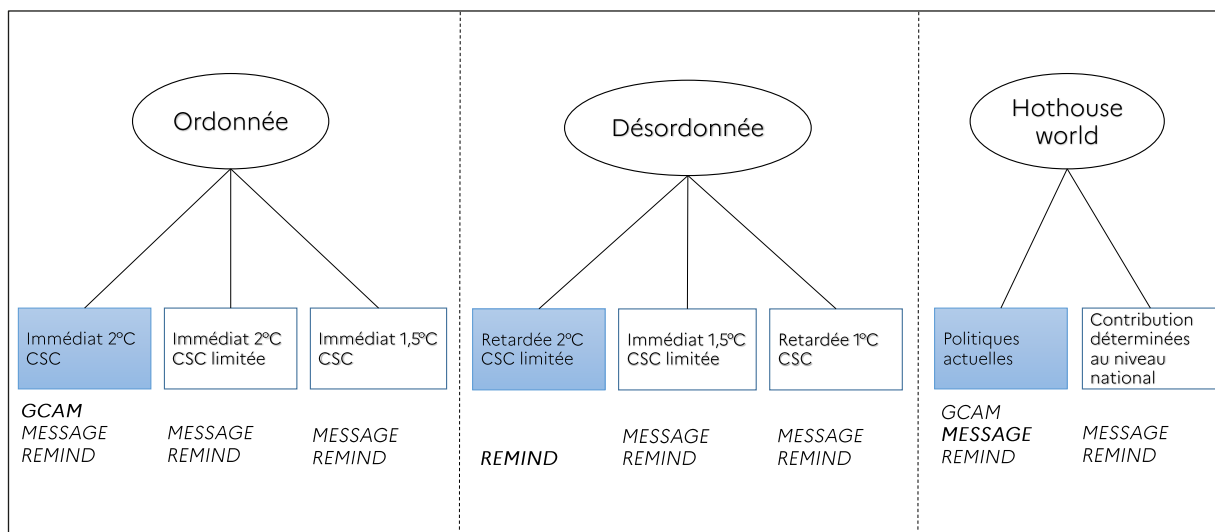


Figure 21 : Scénarios du NGFS, caractéristiques et modèles marqueurs

Source : NGFS (2020), NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors.

Lecture : les trois cercles représentent les familles de scénarios du NGFS ; les rectangles, les scénarios qui composent chaque famille: représentatifs (en bleu) et alternatifs (en blanc) ; à chaque scénario représentatif sont associés les modèles utilisés (en gras le modèle « marqueur »).

Les scénarios produisent des séries chronologiques par pas de 5 ans (jusqu'en 2100), intégrant à la fois les risques de transition (représentés par les modèles IAM) et les risques physiques (sur la base de modèles d'impact climatique et de circulation générale et d'une fonction de dommages) à travers les variables suivantes :

- la demande énergétique ;
- les capacités énergétiques ;
- les investissements énergétiques ;
- les prix de l'énergie ;
- le prix du carbone ;
- les émissions de CO₂ ;
- les températures ;
- les variables liées à l'agriculture ;
- le PIB (en parité de pouvoir d'achat ou de taux de change).

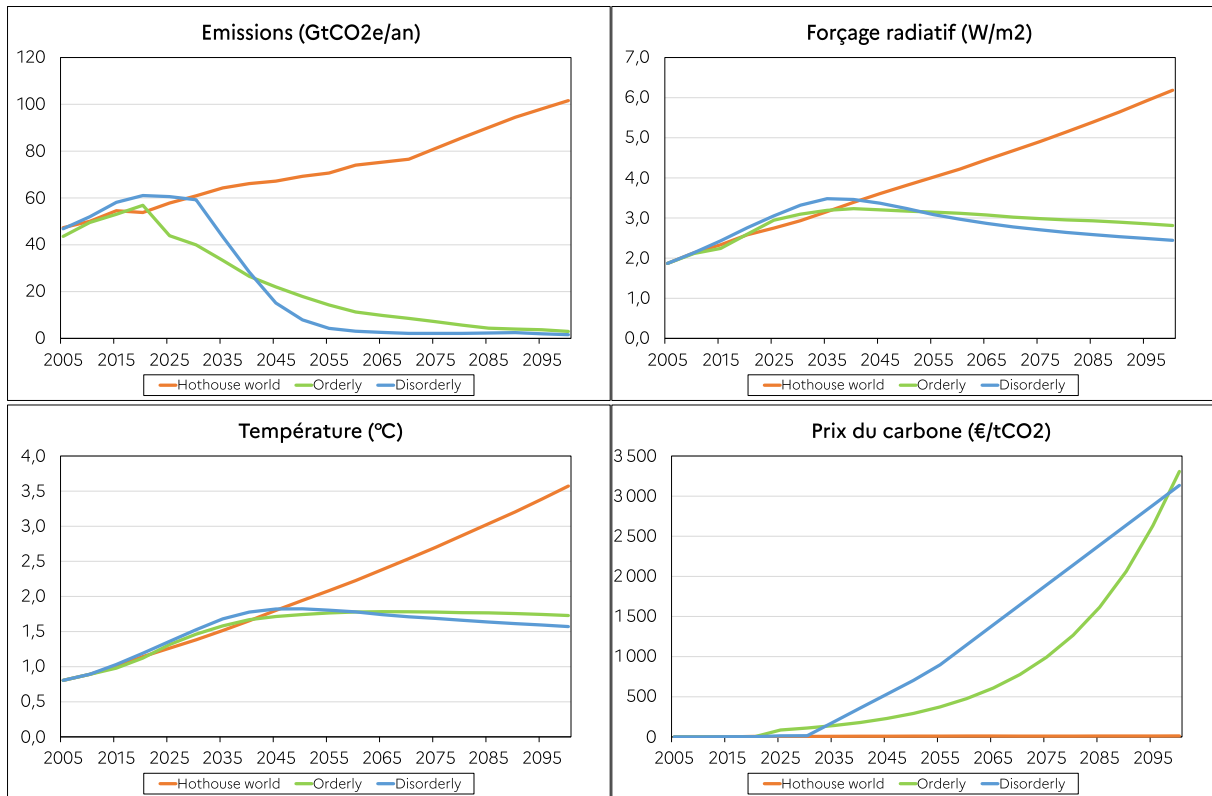


Figure 22 : Scénarios de référence de haut niveau du NGFS

Source : NGFS (2020), NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors.

Note : les trajectoires sont issues du scénario représentatif correspondant et sont associées à leur modèle marqueur (cf. Figure 21).

Annexe 2 : Les scénarios prospectifs français

La Stratégie Nationale Bas-Carbone (Ministère de la Transition Ecologique)

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) est définie en application de la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV), à l'article 173, comme un outil de pilotage pour animer et suivre la politique de décarbonation de l'économie française et de transformation de son modèle énergétique. La stratégie bas-carbone constitue ainsi un des instruments du gouvernement pour mettre en application les objectifs définis au niveau européen et national et traduits dans l'article L100-4 du code de l'énergie. La première SNBC publiée en 2015 (SNBC 1) visait l'objectif de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2050 par rapport à 1990 (Facteur 4) avec un objectif intermédiaire défini par la LTECV de réduction de 40 %, par rapport à 1990, à l'horizon 2030, conformément aux objectifs européens.

La seconde et dernière version (SNBC 2) vise un objectif plus ambitieux de neutralité carbone à l'horizon 2050, en plus des précédents objectifs de la LTECV déjà intégrés dans la SNBC 1 (réduction de 50 % de la consommation d'énergie finale en 2050 par rapport à la référence de 2012, répartition du budget carbone par grands secteurs sur chacune des périodes 2019-2023, 2024-2028, 2029-2033). Elle s'articule avec et complète un ensemble de programmes et plans nationaux, comme la Programmation Pluriannuelle de l'Energie⁸⁷. La SNBC s'appuie sur un scénario socio-économique (dit « SNBC-PPE ») élaboré au cours d'un exercice de modélisation. Ce scénario, dit « Avec Mesures Supplémentaires » (AMS), intègre des mesures de politiques publiques, en supplément de celles existant aujourd'hui, qui permettraient à la France de respecter ses objectifs climatiques et énergétiques à court, moyen et long-terme. Il dessine une trajectoire possible de réduction des émissions de gaz à effet de serre jusqu'à l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, à partir de laquelle sont définis les budgets carbone. En particulier, il est rapporté à un scénario tendanciel en l'absence de ces mesures supplémentaires après le 1er juillet 2017, scénario dit « Avec Mesures Existantes » (AME) dans un cadre démographique et macroéconomique commun, notamment en termes de croissance économique tendancielle avant mesures.

Le scénario SNBC-PPE a été réalisé distinctement par deux équipes de modélisation : d'une part le CIRED avec le modèle Imaclim, et d'autre part l'ADEME et le CGDD avec le modèle Three-ME. Une évaluation macroéconomique compare le scénario sous-jacent à la SNBC (scénario dit AMS) à une trajectoire tendancielle en l'absence de mesures supplémentaires après le 1er juillet 2017 (scénario dit "AME"). Cette évaluation n'intègre pas l'impact des conséquences futures du changement climatique. Selon les deux modélisations, la SNBC générerait un gain de PIB similaire, de l'ordre de 3 à 4 points à l'horizon 2050 (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2020).

Autres exercices prospectifs nationaux

Au niveau français, d'autres études sont menées en amont ou en parallèle de la SNBC et peuvent être considérés comme complémentaires à cette trajectoire :

- les visions de l'ADEME ;
- le scénario négaWatt ;
- les scénarios sur l'électricité de RTE ;
- les scénarios sur le gaz de GRT gaz et GrDF.

⁸⁷ Pour voir la liste exhaustive de ces plans, se référer à l'évaluation environnementale stratégique de la Stratégie Nationale Bas Carbone (2020).

Annexe 3 : Le modèle Three-ME

Le modèle Three-ME, développé depuis 2008 par l'OFCE et l'ADEME, et co-utilisé par le Ministère de la transition écologique depuis 2013, est un modèle d'équilibre général calculable qui représente une vue d'ensemble de l'économie française au moyen d'un système complet de marchés où les agents interagissent en prenant des décisions fondées microéconomiquement par la maximisation de leur profit ou de leur utilité. Ce modèle est destiné spécifiquement à l'évaluation pour la France des impacts des politiques énergétiques et environnementales. Le niveau fin du détail sectoriel et de la structure de la fiscalité permet de mettre en évidence l'hétérogénéité potentiellement forte des effets des chocs de transition selon les secteurs considérés.

Le modèle Three-ME est un modèle keynésien au sens où la dynamique des prix et de l'offre de monnaie rend compte de déséquilibres transitoires sur les marchés. Le modèle est d'inspiration néokeynésienne : à la différence des modèles walrassiens, les prix ne s'ajustent pas instantanément pour équilibrer l'offre et la demande sur les marchés. Sur le marché des biens, le prix notionnel est obtenu en appliquant un taux de marge sur les coûts unitaires de production (théorie du *mark-up*). Les marges elles-mêmes dépendent de la variation de la demande en volume adressée aux entreprises. Sur le marché du travail, le salaire n'ajuste pas instantanément l'offre et la demande d'emploi. Il peut donc exister un équilibre de sous-emploi chronique et du chômage involontaire. Le salaire est déterminé par une courbe *Wage-Setting*, c'est-à-dire par des négociations entre les salariés et les employeurs sur le marché du travail. Elle suppose que la rémunération du travail dépend du pouvoir de négociation des salariés qui dépend du taux d'inflation, de l'évolution du taux de chômage et de la productivité du travail. Sur le marché du capital, les taux d'intérêts n'équilibrent pas instantanément l'épargne et l'investissement car il est supposé que les investissements peuvent être non seulement financés par l'épargne mais aussi par des crédits bancaires, autrement dit par de la création monétaire. Cette caractéristique limite les possibles effets d'éviction que l'on trouve dans les modèles walrassiens où pour un montant donné d'épargne, la hausse des investissements des uns est financée au détriment des autres. Les taux d'intérêts sont fixés par les autorités monétaires en fonction de l'évolution de l'inflation et de l'activité économique (règle de Taylor).

Le modèle Three-ME est multisectoriel (cf. **Figure 24**) : il représente 37 secteurs économiques (dont 17 secteurs énergétiques et 4 secteurs de transport), ce qui permet d'analyser les effets des transferts d'activité d'un secteur à un autre (en termes d'emploi, d'investissement, d'importations, etc.). Enfin, le modèle Three-ME considère quatre facteurs de production : le capital, le travail, les consommations intermédiaires et les différentes énergies (pétrole, biocarburant, nucléaire, gaz, géothermie, éolien, etc.) plus ou moins substituables. Le choix des facteurs de production résulte de trois arbitrages (cf. **Figure 23**) : entre capital, travail, énergie et biens intermédiaires (niveau 1), entre types d'énergie, de capital, de biens intermédiaires ou de transport (niveau 2), et entre biens domestiques et bien importés (niveau 3). La substitution entre les différents facteurs de production est donnée par des élasticités de substitution pour chacun des trois niveaux.

Le modèle Three-ME est un modèle hybride au sens où il juxtapose une approche macroéconomique « *top-down* » avec une approche sectorielle « *bottom-up* » (ou technico-économique) pour déterminer la demande énergétique. Cela permet de prendre en compte le caractère particulier de l'énergie qui n'est jamais demandée pour elle-même, mais en complément d'une autre demande (logement, transport), elle-même liée à la détention de certains biens (parc immobilier et de véhicules). Elle évolue en fonction des besoins de transport ou de chauffage et selon la variation des performances énergétiques du parc immobilier et de véhicules. Les ménages réalisent des arbitrages entre diverses classes énergétiques de bâtiments et de véhicules en fonction de leurs coûts d'usage respectifs. Ce choix de modélisation permet de mesurer finement les émissions de CO₂ de l'économie, qui dépendent des stocks de bâtiments et de véhicules, et non des flux. Le choix des ménages entre les autres biens de consommation est quant à lui simulé via une élasticité de substitution.

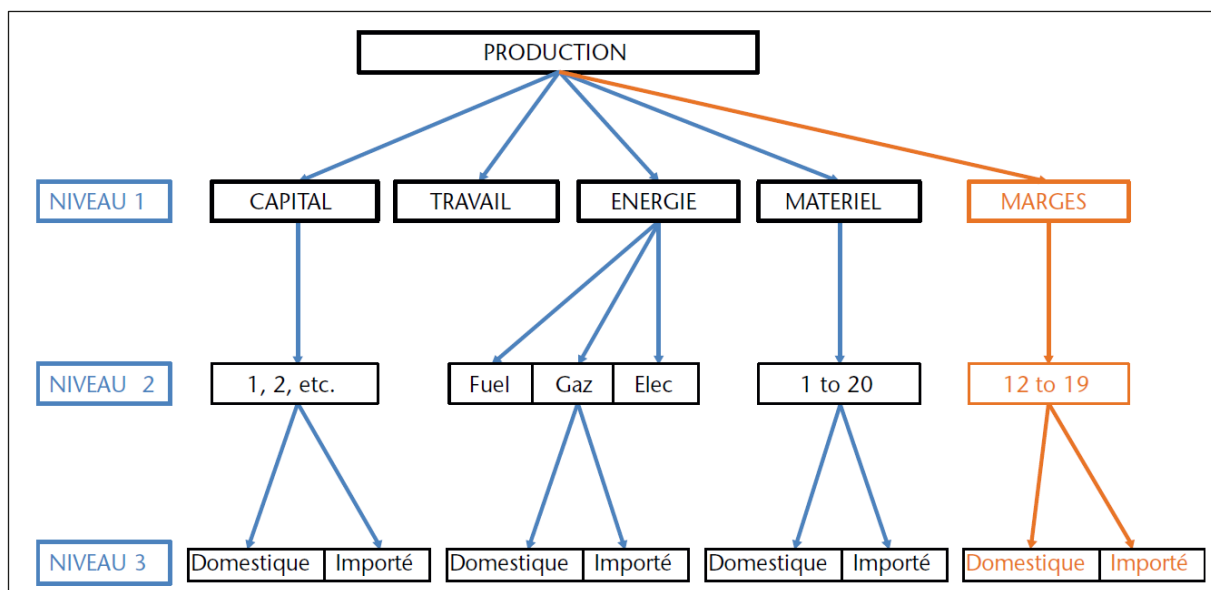


Figure 23: Structure de production dans le modèle Three-ME

Source : Callonnec et al. (2013), Les propriétés dynamiques de long terme du modèle ThreeME.

	Secteurs	PROD (%)	Secteurs	PROD (%)
INDUSTRIE	1. Agriculture, sylviculture et pêche	2,4	21. Extraction et agglomération de la houille (Charbon)	0,001
	2. Industrie agro-alimentaire	3,7	22. Raffinage et distribution de pétrole	
	3. Automobile	2,7	1. Pétrole	1,5
	4. Fabrication de verre et d'articles en verre	0,2	2. Biocarburants	0,0
	5. Fabrication de produits céramiques	0,6	23. Production et distribution de gaz	
	6. Papier et carton	0,6	1. Nucléaire	1,1
	7. Industrie chimique minérale	0,2	2. Centrale fioul	0,0
	8. Industrie chimique organique	0,7	3. Centrale combinée gaz	0,1
	9. Transformation des matières plastiques	0,8	4. Centrale charbon	0,1
	10. Sidérurgie et première transformation de métaux ferreux	0,7	5. Eolien	0,0
	11. Production de métaux non ferreux	0,4	6. PV	0,0
	12. Autres Industries	13,5	7. Hydraulique	0,2
	13. BTP	7,0	8. Cogénération	0,0
TRANSPORT	14. Transports ferroviaires	0,3	24. Production et distribution de gaz	
	15. Transport routier de voyageurs	0,5	1. Gaz naturel	0,6
	16. Transport routier (ou par conduites) de marchandises	1,6	2. Bois énergie	0,1
	17. Transports par eau	0,4	3. Biogaz	0,0
SERVICE	18. Transports aériens	0,6	4. UIOM	0,0
	19. Services marchands	48,0	5. Géothermie	0,0
	20. Services non marchands	11,5	6. Cogénération	0,0

Figure 24: Désagrégation sectorielle du modèle Three-ME, répartition de la production par secteur

Source : Callonnec et al. (2013), Les propriétés dynamiques de long terme du modèle ThreeME.

Annexe 4 : Recensement des conséquences économiques du changement climatique en France

(i) Scénarios RCP et hausse de température mondiale relativement à 1850 – 1900 (en °C)

	Période	Hausse de température (moyenne)	Hausse de température (intervalle)
RCP 2.6	2016 - 2035	1,1	0,9 - 1,3
	2046 - 2065	1,6	1 - 2,2
	2081 - 2100	1,6	0,9 - 2,3
RCP 4.5	2016 - 2035	1,1	0,9 - 1,3
	2046 - 2065	2	1,5 - 2,6
	2081 - 2100	2,4	1,7 - 3,2
RCP 6.0	2016 - 2035	1,1	0,9 - 1,3
	2046 - 2065	1,9	1,4 - 2,4
	2081 - 2100	2,8	2 - 3,7
RCP 8.5	2016 - 2035	1,1	0,9 - 1,3
	2046 - 2065	2,6	2 - 3,2
	2081 - 2100	4,3	3,2 - 5,4

Source : GIEC.

(ii) Risques physiques liés à la hausse de la fréquence et d'amplitude d'évènements chroniques ou tendanciels

IMPACT	CANAL ECONOMIQUE	VARIABLE ECONOMIQUE	UNITE	2016-2035	2046-2065	2081-2100	Commentaire
Hausse du niveau de la mer	Perte de capital	Expected annual costs (EAD)	Mds€/an	0,93	3,94	[23,6; 96]	RCP 8.5 - SSP5 - Avec adaptation
		Pertes assurantielles	M€/an		[43; 78]		RCP 8.5 - Sans adaptation
		Nombre de personnes affectées par an	% supplémentaire affecté par les inondations			[10 %; 50%]	
Hausse de la température de l'air et modification du régime de précipitations	Demande énergétique	Demande en énergie	Evolutions de la demande en % (par rapport à la période 1961-1990)			-16 %	RCP 8.5 - Sans adaptation
	Rendements énergétiques	Parc éolien	Evolution de la productivité en % (par rapport au potentiel de 2012)	-2 %	-3 %	-4 %	RCP 8.5 - Sans adaptation
		Parc PV		-1 %	-1,2 %	-1,5 %	RCP 8.5 - Sans adaptation
		Centrales hydrauliques		2,8 %	-1 %	-6 %	RCP 8.5 - Sans adaptation
		Centrales thermiques		-5,5 %	-8 %	-14,5 %	RCP 8.5 - Sans adaptation

	Revenus du tourisme	Nombre de nuitées de mai à octobre	Evolution du nombre de nuitées en % (par rapport à 1980-2005)	[+5% ; +10%]	[+10% ; +20%]		RCP 4.5/8.5 - Sans adaptation		
		Nombre de nuitées en hiver		[-1.5% ; -0.5%]	[-2% ; -0.6%]		RCP 4.5/8.5 - Sans adaptation		
		Capacité opérationnelle des stations de ski sur la saison de ski : % de stations avec un enneigement faible	Capacité opérationnelle en %			28 %	0 %	RCP 8.5 - Sans adaptation	
	Rendements agricoles	Superficie de terre arable (km ²)	Evolution de la superficie en % (par rapport à climat de réf. 1960-1990)			-50 %		RCP 8.5 - Sans adaptation	
		Superficie de prairies (km ²)				50 %		RCP 8.5 - Sans adaptation	
		Superficie de terres en agriculture intensive (km ²)				-50 %		RCP 8.5 - Sans adaptation	
		Elevage volaille (nombre d'animaux)	Evolution du bétail en % par rapport à 2020			-4 %	-15 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Production laitière (nombre d'animaux)				-9 %	-32 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Elevage de bœuf (nombre d'animaux)				-1 %	-8 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement blé	Evolution des rendements en % par rapport à 2020			1 %	4 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement maïs irrigué				6 %	21 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement orge				-1 %	-4 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement millet				9 %	26 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement riz				7 %	25 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement sorgho				17 %	68 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement huiles (colza, soja, tournesol)				13 %	30 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
		Rendement légumes				10 %	26 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
Rendement fruits				8 %	21 %		RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation		
Rendements sylvicoles	Evolution de productivité	Evolution de la superficie en % (par rapport 1960-1990)				-50 %		RCP 8.5 - Sans adaptation	
	Perte de production liée aux vents	Evolution de la perte en % (par rapport 2000-2010)			38 %		RCP 4.5 - Sans adaptation		

		Perte de production liée aux scolytes		24 %			RCP 4.5 - Sans adaptation
		Perte de production liée aux feux de forêt		25 %			RCP 4.5 - Sans adaptation
	Productivité au travail	Productivité du travail en intérieur	Evolution de la productivité en % par rapport à 1985-2005		[0% ; +2%]	[-10% ; -2%]	RCP 8.5 - Sans adaptation
		Productivité du travail (secteur industrie)			[-10% ; -5%]		RCP 8.5 - Sans adaptation
		Productivité au travail en extérieur			[-5% ; 0%]	[-12% ; -2%]	RCP 8.5 - Sans adaptation
		Productivité du travail (construction)			-10 %		RCP 8.5 - Sans adaptation
		Productivité au travail en extérieur			0 %	[-0.5% ; 0%]	RCP 8.5 - Avec adaptation
		Evolutions de la production urbaine		Milliards d'euros annuels (Mds€/an)		[0,5 ; 2,3]	[0,65 ; 2,5]
Evolutions de la production urbaine			[0,156 ; 0,08]		RCP 8.5 - Avec adaptation		
Maladie	Productivité au travail	Nombre de jours de travail perdus à cause du changement climatique	Nombre de jours / an	21 333	25 600	29 866	RCP 6.0 - Sans adaptation
Hausse de la température et modification du pH de la mer	Rendements piscicoles	Biomasse animale	Evolution en % en 2100 par rapport à 1990-2000			[0% ; +50%]	RCP 8.5 - Sans adaptation
		Potential de prise en haute mer	Evolution en % par rapport à 2019	[-6% ; -3%]	[-20% ; -5%]	[-64% ; -16%]	RCP 8.5 – Sans adaptation
		Variation de la VAN pour le secteur de la pêche	Evolution en % par rapport à 1980-2005		-10 %		RCP 8.5 – Sans adaptation

Source : rapport interne ADEME.

(iii) Risques physiques liés à la hausse d'évènements climatiques extrêmes

IMPACT	CANAL ECONOMIQUE	VARIABLE ECONOMIQUE	UNITE	2016-2035	2046-2065	2081-2100	Commentaire
Sécheresse, canicules, vagues de froid, inondations côtières et crues	Productivité au travail	Productivité de la chaîne d'approvisionnement des entreprises	Evolution de la productivité en % par rapport à 1990-2015	-12,41 %	-14,75 %	-14,75 %	RCP 4.5 - Sans adaptation
Inondations, crues	Perte de capital	Expected Annual costs (EAD)	Milliards d'euros / an (Mds€/an)	0,5	3	20	RCP 8.5 - SSP2 - Sans adaptation
				[0,5 ; 3,1]	[2,5 ; 8,5]	[5 ; 10,4]	RCP 8.5 - SSP3 - Sans adaptation
				[0,5 ; 3,8]	[3,5 ; 6]	[9 ; 33,9]	RECP 8.5 - SSP5 - Sans adaptation
				[0,5 ; 2,5]	[0,5 ; 2,5]	[1,3 ; 6,6]	RECP 8.5 - Sans adaptation
Tous types de sinistres (inondations, sécheresses, canicules, tempêtes, feux etc.)				5,623	7,592	20,872	RECP 6.0 - Sans adaptation
Inondations, crues				13,5	67,5	RCP 8.5 - SSP5 - Avec adaptation	
				1,109	1,444	4,618	RCP 6.0 - Avec adaptation
				1			RCP 6.0 - Avec adaptation
Sécheresse				Coût moyen annuel		1,5	RCP 8.5 - Avec adaptation -
				Coûts d'indemnisations		0,503	RCP 8.5 - Sans adaptation
	Coût moyen annuel	8		RCP 8.5 - Sans adaptation -			

Source : rapport interne ADEME.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 2DII. (2019). *2° Scenario Analysis - Insurance Companies Operating in California*.
- 2DII. (2020). *PACTA for Banks: Methodology Document*.
- ACPR. (2019). Les assureurs français face au risque de changement climatique. *Analyses et synthèses, no. 102*.
- ACPR. (2019). Les groupes bancaires français face au risque de changement climatique. *Analyses et synthèses, no. 101*.
- ADEME - G. Callonnec, H. Gouédard, P. Jolivet. (2020). *Evaluation d'un scénario SNBC 2 sans hausse de taxe carbone et sans prix-fictif ad hoc*. Note complémentaire au rapport du Haut Conseil pour le Climat.
- ADEME - S. Martin, A. Gaspard. (2016). *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité*. ADEME Editions.
- ADEME. (2019). *La contribution climat-solidarité*.
- Alestra, C., Cette, G., Chouard, V., & Lecat, R. (2020). Long-term growth impact of climate change and policies: the Advanced Climate Change Long-term (ACCL) scenario building model. *Banque de France Working Paper Series no. 759*.
- Allen, T., Dees, S., Boissinot, J., Mateo, C., Graciano, C., Chouard, V., . . . Vernet, L. (2020). Climate-Related Scenarios for Financial Stability Assessment: an Application to France. *Banque de France Working Paper Series no. 774*.
- Appeddu, A., Suarez-Lledo, J., Licari, & Juan. (2012). Quel scénario choisir - Approche macroéconomique des stress tests. *Banque Stratégie no. 300*.
- Bank of England. (2019). The 2021 biennial exploratory scenario on the financial risks from climate change. *Discussion Paper*.
- Bank of England. (2020). *Update on the Bank's approach to the Climate Biennial Exploratory Scenario in selected areas*.
- Battiston, S., & Monasterolo, I. (2019). A climate risk assessment of sovereign bonds' portfolio.
- Battiston, S., Mandel, A., Monasterolo, I., Schütze, F., & Visentin, G. (2016). *A climate stress test of the financial system*.
- BIS. (2009). Principles for sound stress testing practices and supervision.
- BNP Paribas. (2016). Stress-testing equity portfolios for climate change impacts: the carbon factor.
- Boitier, B., Callonnec, G., Douillard, P., Epaulard, A., Gherzi, F., Masson, E., & Mathy, S. (2015). *La transition énergétique vue par les modèles macroéconomiques*. Document de travail n°2015-05, France Stratégie.
- Bolton, P., Després, M., Pereira da Silva, L. A., Samama, F., & Svartzman, R. (2020). "Green Swans": central banks in the age of climate-related risks. *Bulletin de la Banque de France 229/8*.
- Callonnec, G., & Combaud, M. (2019). *Les effets macroéconomiques et environnementaux de la fiscalité carbone*. Rapport particulier n°4, Conseil des Prélèvements Obligatoires.
- Callonnec, G., Landa Rivera, G., Malliet, P., Saussay, A., & Reynès, F. (2016). Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME - Un cahier de variantes. *Revue de l'OFCE, no. 149*.
- Cambridge Econometrics. (2019). *E3ME Technical Manual v6.1*.
- Carney, M. (2015). Breaking the tragedy of the horizon – climate change and financial stability. *Speech by Mr Mark Carney, Governor of the Bank of England*. London.

- Chen, Y.-H. H., Sergey, P., Reilly, J. M., Morris, J. F., & Babiker, M. H. (2015). *The MIT EPPA6 Model: Economic Growth, Energy Use and Food Consumption*. Joint Program Report Series.
- Committee of European Banking Supervisors. (2010). *CEBS Guidelines on Stress Testing*.
- Crassous, R., Quirion, P., Ghersi, F., & Combet, E. (2009). *Taxe carbone : Recyclage des recettes et double dividende*. Conseil économique pour le développement durable.
- De Williencourt, C., & Jacquetin, F. (2019). Le recours à la modélisation macroéconomique dans l'évaluation des politiques publiques. *Trésor Eco*, no. 252.
- Despres, M., & Hiebert, P. (2020). *Positively green: Measuring climate change risks to financial stability*. European Systemic Risk Board.
- Devulder, A., & Lisack, N. (2020). Carbon Tax in a Production Network: Propagation and Sectoral Incidence. *Banque de France Working Paper Series no. 760*.
- Direction générale de l'énergie et du climat. (2013). *Découvrir les nouveaux scénarios RCP et SSP utilisés par le GIEC*.
- Direction Générale du Trésor. (2017). *Rapport sur l'évaluation des risques liés au changement climatique dans le secteur bancaire*.
- Douillard, P., Epaulard, A., & Le Hir, B. (2016). Modèles macroéconomiques et transition énergétique. *France Stratégie, La Note d'analyse*, no. 43.
- EBA. (2018). *Final report on guidelines on institutions' stress testing*.
- EBA. (2020). *Risk assessment of the European banking system*.
- ECB. (2020). *Guide on climate-related and environmental risks*.
- EIOPA. (2019). Protection gap for natural catastrophe. *EIOPA Staff Discussion Paper*.
- EIOPA. (2020). The pilot dashboard on insurance protection gap for natural catastrophes in a nutshell.
- Ekins, P. (1997). On The Dividends from Environmental Taxation. In T. O'Riordan, *Ecotaxation*. Earthscan Publications.
- Ens, E., & Johnston, C. (2020). *Scenario Analysis and the Economic and Financial Risks from Climate Change*. Bank of Canada. Staff Discussion Paper 2020-3.
- ESRB. (2016). *Too late, too sudden: Transition to a low-carbon economy and systemic risk*. Reports of the Advisory Scientific Committee.
- France Stratégie. (2019). *La valeur de l'action pour le climat - Une valeur tutélaire du carbone pour évaluer les investissements et les politiques publiques*. Rapport de la commission présidée par Alain Quinet.
- Grippa, P., & Mann, S. (2020). *Climate-Related Stress Testing: Transition Risks in Norway*. IMF Working Paper No. 20/232.
- Guivarch, C., & Rozenberg, J. (2013). Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique. *Revue Pollution Atmosphérique, N° spécial climat - Juin 2013*.
- Hebbink, G., Berkvens, L., Bun, M., vanKerhoff, H., Koistinen, J., Schotten, G., & Stokman, A. (2018). The price of transition: an analysis of the economic implications of carbon taxing. *De Nederlandsche Bank Occasional Studies, Volume 16 - 8*.
- I4CE. (2017). *Gérer les risques de transition de son portefeuille : de la théorie à la pratique*.
- IEA. (2020). *World Energy Model - Documentation*.
- IMF. (2019). *The Bahamas: Financial System Stability Assessment*. IMF Country Report No. 19/199.
- Ionescu, L., & Yermo, J. (2014). Stress Testing and Scenario Analysis of Pension Plans. *IOPS Working Papers on Effective Pensions Supervision*, no. 19.

- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Joint Global Change Research Institute. (n.d.). *GCAM v5.3 Documentation: Global Change Analysis Model (GCAM)*. Retrieved from <http://jgcri.github.io/gcam-doc>
- Kara, A. (2019). *Introducing climate change to NiGEM - UN project LINK meeting 2019*. National Institute of Economic and Social Research.
- Krey, V., Havlik, P., Fricko, O., Zilliacus, J., Gidden, M., Strubegger, M., . . . Riahi, K. (2016). *MESSAGE-GLOBIOM 1.0 Documentation*. (International Institute for Applied Systems Analysis - IIASA) Retrieved from <https://docs.messageix.org/projects/global/en/latest>
- Lancesseur, N., Labrousse, C., Valdenaire, M., & Nakaa, M. (2020). Impact économique du changement climatique : revue des méthodologies, d'estimation, résultats et limites. *Documents de Travail de la DG Trésor, no. 2020/4*.
- Landa Rivera, G., Malliet, P., Saussay, A., & Reynès, F. (2018). The State of Applied Environmental Macroeconomics. *Revue de l'OFCE, no. 157*, pp. 133-149.
- Lazard. (2020). *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis - Version 14.0*.
- Luderer, G., Leimbach, M., Bauer, N., Kriegler, E., Baumstark, L., Bertram, C., . . . Strefler, J. (2015). *Description of the REMIND model (Version 1.6)*. University of Potsdam.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. (2020). *Stratégie Nationale Bas Carbone - Rapport d'accompagnement*.
- Monasterolo, I. (2019, July 3). Pricing climate risks and opportunities in investors' portfolios under uncertainty. *Professionals workshop*. EC JRC Ispra.
- National Institute of Economic and Social Research. (2018). *NiGEM technical documentation*.
- NGFS. (2019). Macroeconomic and financial stability - Implications of climate change. *Technical supplement to the First Comprehensive Report*.
- NGFS. (2020). Guide to climate scenario analysis for central banks and supervisors. *Technical Document*.
- Nordhaus, W., & Sztorc, P. (2013). *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*.
- Pindyck, R. S. (2017). The Use and Misuse of Models of Climate Policy. *Review of Environmental Economics and Policy, 11(1)*, 100-114.
- Reynès, F., Yeddir-Tamsamani, Y., & Callonnec, G. (2011). Presentation of the Three-ME Model: Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy policy. *Document de travail de l'OFCE, no. 2011-10*.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., . . . Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change, 42*, 53-168.
- TCFD. (2017). *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*.
- Vermeulen, R., Schets, E., Melanie, L., Kölbl, B., Jansen, D.-J., & Heeringa, W. (2018). An energy transition risk stress test for the financial system of the Netherlands. *De Nederlandsche Bank Occasional Studies, Volume 16 - 7*.
- Weitzman, M. L. (2011). Fat Tails and the Economics of Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy, pp. 275-292*.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1: Principales catégories de risques financiers, actifs et liens avec les risques climatiques.....	8
Tableau 2: Risques ventilés par institutions et instruments financiers.....	10
Tableau 3: Classification des risques de transition	11
Tableau 4: Instruments de politique environnementale.....	12
Tableau 5: Classification des risques physiques.....	14
Tableau 6: Synthèse des impacts économiques de l'évolution du climat en France.....	14
Tableau 7: Catégories d'émissions et périmètre opérationnel du Bilan GES.....	15
Tableau 8: Evolutions de la température moyenne à la surface (a), des précipitations moyennes annuelles (b) et du niveau moyen de la mer (c), profil RCP 2.6 (gauche) et RCP 8.5 (droite).....	19
Tableau 9: Ventilation sectorielle des en-cours de prêts des institutions financières monétaires (IFM) aux sociétés non financières, par activité économique.....	20
Tableau 10: Distribution des secteurs de contrepartie des prêts et avances des banques européennes au secteur non financier (30 juin 2020).....	21
Tableau 11: Secteurs de contrepartie des prêts et avances des principales banques françaises au secteur non financier, au 30 juin 2020.....	22
Tableau 12: Trous de protection assuranciers en Europe.....	25
Tableau 13: Classes des approches narratives selon leur déterminant et la connaissance en amont du scénario.....	28
Tableau 14: Granularité géographique de trois modèles d'évaluation intégrée du GIEC.....	31
Tableau 15: Narratifs et scénarios des premiers exercices climatiques des superviseurs.....	35
Tableau 16: Modèles applicables à l'évaluation des risques financiers liés au climat.....	39
Tableau 17: Modèles et hypothèses des premiers exercices des banques centrales et superviseurs.....	40
Tableau 18: Raffinement d'un modèle CGE pour un stress-test climatique – cas de l'exercice-pilote français.....	43
Tableau 19: Impact sur le PIB français de chocs de transition par des modèles macroéconomiques nationaux.....	44
Tableau 20: Les objectifs affichés d'un scénario climatique, selon l'horizon considéré.....	48

FIGURES

Figure 1: Déclinaison de la réglementation prudentielle – exemples de Bâle I et Bâle II.....	9
Figure 2: Exemple d'un risque de transition - évolution des coûts actualisés de l'énergie moyens sans subvention.....	13
Figure 3: Intensité des émissions de CO2 dans l'air par activité économique.....	17
Figure 4: Indice de vulnérabilité au changement climatique ND-GAIN.....	19
Figure 5: Intensité des émissions de CO2 dans l'air et expositions bancaires cumulées, par activité économique (2018).....	23
Figure 6: Ventilation sectorielle des titres de participation détenus par les institutions financières européennes dans des sociétés cotées (US/EU), par type d'institutions	23
Figure 7: Répartition des engagements bruts totaux des principaux établissements bancaires français par zone géographique, au 30 juin 2018.....	24
Figure 8: Description des scénarios SSP et de leur narratif	26
Figure 9: Atteignabilité des cibles de forçage radiatif (RCP) parmi les scénarios SSP.....	27
Figure 10: Déclinaison de l'approche narrative d'un stress-test climatique.....	28
Figure 11: Matrice du NGFS et articulation entre scénarios représentatifs et scénarios alternatifs.....	32
Figure 12: Hétérogénéité des impacts économique et environnemental de taxes carbone en UE, selon le recyclage.....	44
Figure 13: Carbon pass-through et effets économiques directs.....	45
Figure 14: Les trois catégories de scénarios réalisés par le GIEC.....	49
Figure 15: Interactions entre économie, climat et environnement.....	50
Figure 16: Trajectoires socio-économiques partagées selon les enjeux d'atténuation et d'adaptation	51
Figure 17: Modèles IAM utilisés pour la synthèse des trajectoires socio-économiques partagées.....	51
Figure 18: Trajectoires socio-économiques partagées.....	52
Figure 19: Déclinaison du scénario SSP2 "middle of the road" selon l'action environnementale.....	53
Figure 20: Définitions et objectifs des scénarios du WEO-2020	54
Figure 21: Scénarios du NGFS, caractéristiques et modèles marqueurs	55
Figure 22: Scénarios de référence de haut niveau du NGFS	56
Figure 23: Structure de production dans le modèle Three-ME.....	59
Figure 24: Désagrégation sectorielle du modèle Three-ME, répartition de la production par secteur	59

SIGLES ET ACRONYMES

2DII	2 Degrees Investing Initiative
ABE	Autorité bancaire européenne
ACPR	Autorité de contrôle prudentiel et de résolution
ADEME	Agence de la transition écologique
AIE	Agence internationale de l'énergie
BCE	Banque centrale européenne
BRI	Banque des règlements internationaux
CGE	Modèle d'équilibre général calculable
DNB	Banque centrale des Pays-Bas
EIOPA	Autorité européenne des assurances et des pensions professionnelles
ESG	Critères environnementaux, sociaux et de gouvernance
ESRB	Conseil européen du risque systémique
EU-ETS	Système communautaire d'échange de quotas d'émission
FMI	Fonds monétaire international
FSAP	Programme d'évaluation du secteur financier
GHG	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
I4CE	Institut pour l'économie du climat
IAM	Modèle d'évaluation intégrée
NACE	Nomenclature des activités économiques dans la Communauté européenne
NGFS	Réseau des banques centrales et des superviseurs pour le verdissement du secteur financier
NiGEM	Modèle macroéconométrique du <i>NIESR</i> (institut de recherche britannique)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
RCP	Profil de concentration représentatif
RWA	Actifs à risques pondérés
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
SPA	Hypothèses de politique commune
SSP	Trajectoires socio-économiques partagées
TCFD	Groupe de travail sur les informations financières liées au climat
THREE-ME	Modèle macroéconomique multisectoriel pour l'évaluation des politiques environnementales et énergétiques
UTCATF	Utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie
VAR	Modèle vectoriel autorégressif
VaR	Valeur à risque

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



STRESS-TESTS CLIMATIQUES PAR SCENARIOS : DE L'ANALYSE DES RISQUES A LA MODELISATION

Ce document de travail présente une revue de l'art sur la réalisation de tests de résistance climatiques par les banques centrales, superviseurs et institutions internationales et sur la modélisation macroéconomique des scénarios climatiques qu'ils nécessitent. Ces outils de gestion du risque, utilisés couramment par les institutions financières pour mesurer leur résilience à la matérialisation d'un risque économique et financier à court terme, nécessite des adaptations structurelles pour être étendus aux risques climatiques, qu'il s'agisse des risques physiques, de transition ou de

responsabilité. Des enjeux spécifiques doivent être considérés : horizon de temps potentiellement très longs, granularité fine des scénarios pour tenir compte des nombreuses spécificités internationales et sectorielles, incertitude radicale et amplitude extrême des risques, interdépendance des risques physiques et de transition.

Les travaux portés par l'ADEME ont pour objectif de faire des propositions et préconisations en s'appuyant sur l'expertise macroéconomique, prospective et sectorielle de l'agence.

*Avec la contribution du programme LIFE de la Commission européenne.
La Commission européenne n'est pas responsable pour l'utilisation du contenu qui en est fait.*

