

Les risques climatiques et leurs coûts pour la France Une évaluation macroéconomique

Modélisation des fonctions de
dommages sectorielles et évaluation
d'impact



EXPERTISES

Décembre
2023



Avec la contribution
du programme LIFE
de l'Union
européenne



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 :

Mathieu Garnero (ADEME)

Patrick Jolivet (ADEME)

L'ADEME remercie les économistes de la Banque de France pour le partage des hypothèses de transition au niveau mondial issus de la base du NGFS.

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME (Florian JACQUETIN. Gaël CALLONNEC. Hervé GOUËDARD. Albertine DEVILLERS). 2023. Les risques climatiques et leurs coûts pour la France. Une évaluation macroéconomique. 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 Exécutive Prospective et Recherche

SOMMAIRE

RESUME.....	
1. INTRODUCTION	5
1.1. L'analyse par scénarios climatiques.....	5
1.2. Modèles macroéconomiques et risques physiques.....	6
1.3. Adaptation du modèle Three-ME aux risques climatiques	13
2. ESTIMATION D'UNE FONCTION DE DOMMAGES EN FRANCE	18
2.1. Impacts sectoriels retenus.....	18
2.2. Calibration de fonctions de dommages « bottom-up »	21
2.2.1. Impact des risques chroniques en France.....	21
2.2.1.1. Impacts significatifs : travail extérieur, rendements agricoles, niveau de la mer et inondations.....	21
2.2.1.2. Autres risques chroniques.....	23
2.2.2. Impact des risques aigus en France	26
2.2.2.1. Impacts directs des catastrophes naturelles en France	26
2.2.2.2. Impacts des évènements extrêmes dans le monde sur le commerce français ...	29
2.3. Modélisation du coût des dommages	29
2.4. Évaluation du coût des dommages macroéconomiques et comparaison avec le NGFS	31
3. APPLICATIONS A DES SCENARIOS MACROECONOMIQUES DE TRANSITION	33
3.1. Cadre méthodologique, hypothèses socioéconomiques, politiques et climatiques.	33
3.2. Scénario de référence : le scénario Net Zero 2050 avec risques physiques.....	37
3.3. Stress-test climatique n°1 : scénario de transition retardée (« Delayed transition »).	40
3.4. Stress-test climatique n°2 : scénario d'inaction (« Current policies »).....	45
4. CONCLUSION, LIMITES ET PERSPECTIVES.....	48
4.1. Mécanismes économiques et secteurs à risques	48
4.2. Développer des scénarios à destination des acteurs économiques.....	49
ANNEXE 1 : HYPOTHESES DES SCENARIOS DE TRANSITION.....	52
ANNEXE 2 : IMPACTS MACROECONOMIQUES DES SCENARIOS CLIMATIQUES	55
ANNEXE 3 : PRINCIPALES FONCTIONS DE DOMMAGES SECTORIELLES...57	
ANNEXE 4 : COUT DES CATASTROPHES NATURELLES EN FRANCE	58
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	64
SIGLES ET ACRONYMES	66

RESUME

La matérialisation du changement climatique s'accompagnera de risques de transition (conséquences économiques adverses des efforts de décarbonation) et de risques physiques associés aux coûts des dommages du changement climatique. Ces frictions sont peu représentées dans les méthodes d'analyse par scénario mais font l'objet d'attentions accrues des agents économiques, qui cherchent à anticiper les risques pesant sur leur activité ou leur portefeuille financier. En s'appuyant sur le cadre méthodologique du NGFS (Network for Greening the Financial System), l'ADEME propose une estimation du coût macroéconomique des risques climatiques en France.

Pour cette étude, l'ADEME s'est appuyée sur les hypothèses du NGFS qui définit plusieurs narratifs de transition possibles aux niveaux mondial et régional. Le modèle Three-ME (ADEME/OFCE) a été substantiellement modifié pour représenter les risques physiques associés à plusieurs trajectoires de température, et en particulier pour modéliser les contraintes pesant sur la production lorsque celle-ci est dépendante de services écosystémiques. Les risques chroniques sont calibrés à partir de données scientifiques issues d'une large revue de littérature et les risques aigus à partir d'une exploitation exhaustive de la base de données internationale sur les situations d'urgence (EM-DAT), les effets des catastrophes naturelles restant toutefois représentés de façon déterministe. Ces coûts sont ensuite intégrés au modèle de manière « bottom-up », c'est-à-dire de manière spécifique au niveau de chaque agent et chaque secteur concerné, à la fois au niveau de l'offre et de la demande. Elle s'écarte des modélisations agrégées dites « top-down » comme cela fut souvent le cas dans les modèles macro-environnementaux. Enfin, les risques de transition font suite aux précédents travaux de l'ADEME (Boitier, et al., 2023) et s'appuient sur les hypothèses du NGFS et de l'AIE. Les montants des actifs échoués, dépréciés de manière anticipée au cours de la transition, sont issus de l'Agence internationale des Energies Renouvelables (IRENA, 2017).

En associant risques de transition et risques physiques, ces travaux préliminaires permettront d'approfondir les projections institutionnelles de long terme, mais aussi de proposer de nouvelles capacités d'analyse aux agents économiques : par des exercices d'alignement encourageant la réorientation des activités économiques vers des activités ou des actifs bas carbone, ou des exercices de stress-tests climatiques visant à mesurer les risques financiers associés à des hypothèses climatiques plus défavorables. Du fait des coûts échoués et des dommages plus importants, le scénario retardé (transition soudaine et non anticipée à partir des années 2030) apparaît ici comme le plus adverse pour l'économie française à moyen terme (-5 points de PIB en 2050), mais c'est bien le scénario d'inaction qui porterait les plus grands risques en 2^{ème} moitié de siècle (-7 points en 2100).

Les options de modélisation et les différentes estimations retenues hors-modèle sont cruciales dans les résultats des scénarios, qui doivent donc être interprétés avec précaution. L'ADEME encourage la poursuite des travaux visant à préciser le coût des frictions macroéconomiques (notamment en termes d'emplois) et le coût des dommages du changement climatique. Ces exercices gagneraient à être étendus dans des modèles multisectoriels en économie ouverte, afin de préciser les effets dynamiques liés aux échanges commerciaux et aux chaînes d'approvisionnement, mais aussi les déséquilibres financiers affectant les marchés mondiaux (taux d'intérêt, change, matières premières). Enfin, quel que soit le scénario, les perturbations sectorielles sont si importantes que celles-ci peuvent affecter des acteurs individuels même si l'environnement macroéconomique reste favorable. Cela peut encourager à explorer d'autres pistes de modélisation, avec des narratifs de transition plus variés (comme ceux sous-jacents aux scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME), mais aussi par des stress-tests de court-terme, qui marqueraient alors un nouveau pas vers l'intégration prudentielle des risques climatiques.

1. Introduction

1.1. L'analyse par scénarios climatiques

L'analyse par scénario économique constitue un levier privilégié par les organisations gouvernementales et internationales pour anticiper, planifier et estimer les conséquences et opportunités de multiples futurs climatiques. Sous l'impulsion des initiatives internationales (TCFD, 2017) et des superviseurs (NGFS, 2021), elle se développe désormais au sein de l'ensemble de l'économie, incluant les secteurs financiers et non financiers, afin d'estimer les risques et opportunités économiques associés à ces futurs.

Ces scénarios font face à de multiples défis, en particulier lorsqu'ils visent à éclairer les risques liés au climat : risques physiques, aigus ou chroniques (impacts aujourd'hui sur les passifs des assurances et la valeur des actifs financiers résultant des événements climatiques et météorologiques) et risques de transition (risques financiers liés au processus d'ajustement vers une économie bas-carbone). Ces risques font face à une triple incertitude, liée à la matérialisation concrète attendue des politiques de transition (incertitude politique), à l'évolution du climat qui en résultera (incertitude climatique) et à sa matérialisation sur l'ensemble des systèmes physiques et humains (incertitude d'impact).

À ces incertitudes s'ajoute un défi lié à l'introduction et la représentation de l'ensemble de cette dynamique dans les modèles macroéconomiques traditionnels (risque de modèle). Le choix de représentation est encore beaucoup conditionné à l'utilisation d'outils qui n'ont, à l'origine, pas été développés pour répondre aux questions climatiques et dont la compréhension des mécanismes sous-jacents reste encore limitée à la sphère académique (Hourcade, et al., 2021). La modélisation des risques fait encore majoritairement l'objet d'analyses séparées et distinctes, par exemple centrées sur le risque de transition pour les superviseurs financiers : les Banque des Pays-Bas (2018), Banque de France (2020) ou encore Banque du Canada (2021) se sont par exemple explicitement intéressées aux impacts macroéconomiques des risques de transition, tandis que la Banque d'Angleterre a spécifiquement introduit, dans un scénario d'inaction, une modélisation macroéconomique des dommages climatiques à travers un ensemble ciblé de risques estimés hors de l'exercice (Bank of England, 2021).

Dans la continuité de ces approches, cette étude vise à l'élaboration de scénarios réalistes et pertinents de risques, associés à un futur climatique donné et combinant à la fois risques de transition et risques physiques. L'ADEME propose ici une nouvelle méthode pour intégrer les coûts des dommages climatiques, non basée sur les fonctions de dommages macroéconomiques agrégées traditionnelles (et abondamment critiquées par la littérature), mais sur des *fonctions de dommages sectorielles*. Les effets des risques chroniques (qui résultent de changements graduels et durables) ont été estimés et calibrés à partir de la littérature scientifique et intégrés de manière ciblée dans les modèles macroéconomiques. Quant aux risques aigus (ceux qui découlent d'événements extrêmes et de courte durée), imprévisibles et volatiles par définition, ils ont été intégrés en moyenne tendancielle à partir d'une exploitation approfondie de la base de données internationale sur les situations d'urgence (EM-DAT), qui recense, pour la France, le nombre de catastrophes naturelles et le coût des dommages associés. Il ressort que certains risques ciblés contribueraient essentiellement aux impacts macroéconomiques des dommages physiques : l'effet des catastrophes naturelles (en France, mais surtout les conséquences indirectes des catastrophes dans le reste du monde), les rendements agricoles et les dégâts liés à la montée du niveau de la mer et aux inondations fluviales. L'effet des catastrophes naturelles reste très certainement sous-estimé étant donnée l'exhaustivité insuffisante des événements et de leurs coûts dans EM-DAT, mais surtout des effets encore non observés du changement climatique (hausse de certains types d'événements et de leur gravité, boucles de rétraction et points de basculement).

Depuis 2008, l'ADEME réalise des travaux de prospective associés à la transition écologique. Ces travaux s'accompagnent d'évaluations macroéconomiques réalisées par les économistes de l'Agence, dont les dernières projections ont concerné les quatre scénarios de neutralité carbone Transition(s) 2050 (ADEME, 2022) ; ces modélisations sont également mobilisées dans les plans nationaux associés à la Stratégie nationale bas-carbone et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (Callonnec & Cancé, 2022), dans des exercices menés par divers organismes publics (Pisani-Ferry & Mahfouz, 2023 ; IGF, 2022 ; Conseil des

prélèvements obligatoires, 2019) ainsi que dans des exercices sectoriels (comme le passage à un mix énergétique 100 % renouvelable).

Ces exercices peuvent s'interpréter comme la synthèse de trajectoires relativement linéaires et optimales, visant à assurer un ou plusieurs objectifs fixés *ex ante* (baisse des émissions jusqu'à un niveau cible, ajustement à un mix énergétique voulu). Cependant, les risques pouvant affecter les trajectoires économiques n'ont pas été pris en compte. Par exemple, les scénarios prospectifs ADEME consistent en un exercice dit « bottom-up » : les scénarios s'appuient sur une expertise sectorielle et des hypothèses économiques et techniques projetées à un niveau fin ; s'ils traduisent la faisabilité des ajustements et du comportement des agents à un niveau granulaire, ils peuvent manquer de réalisme en termes de représentation de l'action publique ou de choc macroéconomique (ADEME, 2020).

Dans la perspective de cette étude consacrée aux risques, une approche plus traditionnelle de modélisation est retenue, où la transition se traduit par des chocs macroéconomiques. À cette fin, la troisième et dernière version du modèle « Three-ME » (Reynès, et al., 2021) a été mobilisée pour illustrer cette méthode dite « top-down ».

La définition des risques climatiques (Carney, 2015) et la manière de les introduire et les évaluer dans le modèle jouent aussi un rôle central. Ici, le risque de transition s'appuie sur le cadre analytique du NGFS, qui le définit comme le coût d'une transition dite « désordonnée »¹ par rapport à une transition dite « ordonnée » supposée minimiser l'ensemble des risques (dans l'étude, il s'agira de la transition « Net Zero 2050 » assurant, en théorie, des émissions nettes nulles en 2050). Le choc de transition est représenté par l'application d'un coût marginal d'abattement croissant des émissions de CO₂ et simplifié ici comme une fiscalité carbone dont les recettes seront intégralement redistribuées entre les agents. Les risques physiques sont définis comme les dommages additionnels d'un futur climatique par rapport à cette transition ordonnée et découlent de l'application des nouvelles fonctions de dommages sectorielles.

La combinaison de ces risques permet de mesurer le coût complet des risques climatiques, en particulier dans le cas d'une transition désordonnée dite « retardée », marquée par des frictions et un surcroît de dommages physiques. Plus encore, l'introduction du coût des dommages permet de comparer l'impact de différents futurs climatiques au niveau français, du point de vue des acteurs économiques mais aussi des pouvoirs publics. Comme le confirme la littérature, il ressort qu'une transition désordonnée, même très tardive, reste largement bénéfique par rapport à une inaction totale, en particulier à partir de 2050 où les risques de transition finissent par s'estomper et où les dommages climatiques s'accroissent.

1.2. Modèles macroéconomiques et risques physiques

Jusqu'à la fin du siècle précédent, la macroéconomie s'intéresserait essentiellement aux coûts économiques associés à la décarbonation. C'est à partir des années 1990 que la recherche sur le coût des dommages se développe. Elle fait notamment un premier pas majeur en 1992 avec la publication par William Nordhaus du modèle DICE (Dynamic Integrated Climate Economics), modèle d'équilibre général et intertemporel intégrant à la fois les coûts liés à l'atténuation et les coûts des dommages. À travers ce modèle, Nordhaus revendique évaluer, dans une approche coûts-bénéfices, la trajectoire de décarbonation théorique optimale minimisant la somme des coûts macroéconomiques liés au changement climatique (coût de l'atténuation et coût des dommages) : cette trajectoire aurait conduit, à la fin du siècle, à un prix du carbone atteignant 800\$, une baisse des émissions mondiales de 15 %², tandis que la trajectoire de température associée dépasserait les 3°C à horizon 2100. Dans ces tous premiers travaux, les impacts macroéconomiques, légèrement positifs, sont extrêmement négligeables.

Bien qu'extrêmement critiqués par la communauté académique, et par la suite repris et enrichis (à la fois par Nordhaus mais aussi d'autres chercheurs), ces premiers travaux ont posé de nombreuses bases pour la recherche académique. C'est la première fois qu'un modèle macroéconomique regroupe ensemble des outils de simulation traditionnelle (modèles dynamiques d'équilibre général) et un modèle d'évolution

¹ Pour plus de détails, se référer à la documentation technique du NGFS précisée dans les références bibliographiques.

² Par rapport à un scénario tendanciel.

du climat, bien que très simplifié. Le modèle associe à des productions économiques des rejets de gaz à effet de serre, permettant de calculer l'évolution des émissions, puis introduisent les notions de dynamique climatique (liens entre émissions et concentrations atmosphérique et sous-marine), de sensibilité climatique (lien entre concentrations, forçage radiatif³ et hausses de température) et de fonction de dommages (lien entre température et pertes économiques), ce qui permet de postuler une boucle de rétroaction directe entre macroéconomie et climat.

³ Le forçage radiatif (W/m²) est la différence de puissance surfacique entre le rayonnement solaire et le rayonnement terrestre au niveau de la stratosphère. Il dépend notamment des concentrations de gaz à effet de serre, qui réfléchissent une partie du rayonnement terrestre.

Encadré 1 : Construction et estimation des fonctions de dommages par les macroéconomistes

Telles qu'elles sont définies à l'origine, les fonctions de dommages sont des fonctions mathématiques reliant les évolutions de la température à une perte de Produit Intérieur Brut (PIB) agrégées au niveau mondial. Elles sont utilisées dans les modèles d'évaluation intégrée (IAM), soit de manière dynamique en rétroagissant sur l'économie (ex : DICE), soit de manière externe en corrigeant le PIB hors modèle (ex : base de données du NGFS). Autour d'elles va se développer un nouveau champ de la recherche économique, qui va s'intéresser à leur représentation fonctionnelle et à leur calibration.

La forme fonctionnelle retenue a souvent été une fonction polynomiale quadratique, de telle manière à tenir compte de la non-linéarité des effets du changement climatique. Si la majorité des fonctions étudiées modélisent un effet sur le niveau du PIB, certaines d'entre elles représentent plutôt un effet sur le taux de croissance du PIB (NGFS, 2019). La plupart de ces fonctions sont donc de la forme suivante :

$$Y_{réel} = (1 - f(T)) \times Y_{théorique} \quad \text{avec} \quad f(T) = aT + bT^2, \quad 0 \leq f(T) \leq 1$$

Plus que leur forme, qui reste une hypothèse à la discrétion des économistes, c'est la calibration de ces fonctions qui a fait l'objet des plus grandes controverses. Depuis les travaux originaux de Nordhaus (1992), Howard et Sterner (2017) proposent un historique détaillé des méthodes développées pour les estimer :

- Les approches énumératives, qui agrègent un effet économique sur la production à partir de la littérature scientifique ou à la discrétion de certains auteurs, d'une liste de dommages plus ou moins exhaustive ;
- Les approches économétriques, évaluant un effet causal des variations de température sur le PIB : employées à partir des années 2000 sur des données « en coupe » (c'est-à-dire des données régionales pour une même année), ces approches se sont étendues à partir de 2010 à des données « de panel » (c'est-à-dire des données régionales répétées sur plusieurs périodes) ;
- Les approches en équilibre général calculable (CGE), ou approches « bottom-up », qui visent à introduire à la fois du côté de l'offre et de la demande des chocs sectoriels issus de la littérature scientifique, élargissant ainsi le champ de l'approche énumérative en incluant les effets dynamiques d'un modèle macroéconomique.

Ces fonctions sont alors souvent calibrées par des régressions d'estimations de dommages sur les niveaux d'élévation de température correspondants. Mais les données utilisées vont progressivement intégrer, plus que des résultats d'une seule étude, un ensemble de résultats passés pour former des « méta-analyses » qui vont se superposer et rendre plus difficile la lecture des résultats qui dépendent alors de la prépondérance des chercheurs du domaine. Enfin, de nombreux biais significatifs ont été relevés (Howard & Sterner, 2017), portant à la fois sur la méthodologie d'estimation et sur l'exhaustivité et la comparabilité des résultats. Ces limitations sont synthétisées dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Comparaison et limitations des méthodologies d'estimation

Type d'approche	Fourchettes des dommages (% de PIB)	Couverture des dommages	Limitations méthodologiques
Énumérative (années 1990)	2,3 à -11,5% (1,0 - 3,0°C)	Omet un grand nombre de dommages marchands, non-marchands et aigus, et les effets d'équilibre général.	À la discrétion des études scientifiques externes et/ou d'opinions subjectives. Pas d'interaction des dommages et de distinction sectorielle et offre/demande.
Économétrie en coupe (années 2000)	de +0,1 à -16,3 % (0,7 - 3,2°C)	Peut omettre les dommages marchands (ceux non intervenus ou ceux concentrés spatialement).	Risque de biais lié à des variables omises.
Économétrie en panel (années 2010)	de 0,3 à -23% (3,4 - 4,3 °C)	Omet les dommages non-marchands et aigus, et les effets d'équilibre général.	Pas d'explicitation précise des mécanismes économiques en jeu.

Modèles d'équilibre général calculable (années 2010)	de -0,2 à -4,6 % (1,5 - 4,8°C)	Omet les dommages non-marchands et aigus.	À la discrétion des études scientifiques externe et/ou d'opinions subjectives.
--	--------------------------------	---	--

Source : À partir d'Howard et Sterner (2017).

Trois fonctions de dommages mondiales issues de ces travaux serviront de référence aux travaux du NGFS (2019) : deux issues de méta-analyses, de Nordhaus et Moffat (2017) et Howard et Sterner (2017) ; une issue de Kalkuhl et Wenz (2020) à partir de l'économétrie de panel (cf. Figure 17).

Ces travaux feront émerger les modèles d'évaluation intégrée (IAM). Parmi eux, le NGFS (2019) distingue les modèles de première génération, comme DICE, dédiés à l'analyse coût-bénéfice et intégrant l'ensemble de la boucle de rétroaction (émissions, température, bien-être social, coût d'abattement, fonction de dommages), et les modèles de deuxième génération, dédiée à l'évaluation de politiques publiques, et se concentrant davantage sur les trajectoires d'émissions sans représenter l'ensemble de la boucle climatique (et mettant de côté l'évaluation des fonctions de dommages) : on retrouve dans cette catégorie les modèles mobilisés par le GIEC et conduisant aux trajectoires socioéconomiques partagées (Riahi, et al., 2017).

Dans un premier temps, les risques physiques sont restés en retrait des travaux de modélisation macroéconomique. Les premières fonctions de dommages sont agrégées et calibrées à partir de sources limitées⁴. Au fur et à mesure, les méthodes d'estimation seront étendues et leurs paramètres affinés en fonction de nouvelles études et de « méta-analyses » issues de la recherche économique (cf. Encadré 1). Parmi les travaux de modélisation, ce sont en premier lieu des approches dites « top-down », semblables à celle utilisée par Nordhaus, qui seront mobilisées. Elles s'appuient sur un modèle d'offre (par exemple un MEGC), et introduisent le coût total des dommages au niveau macroéconomique. Toutefois, l'évaluation économique du changement climatique était essentiellement « hors modèle » (études économétriques en panel, études sectorielles...⁵), celles-ci étant alors sollicitées pour calibrer les fonctions de dommages.

Une seconde approche, dite « bottom-up » a progressivement émergé, visant à modéliser les impacts du changement climatique plus seulement au niveau de la seule production agrégée, mais sur l'ensemble de la chaîne de valeur et des agents économiques, en distinguant les dommages du changement climatique non plus comme un risque global, mais comme un ensemble d'évènements spécifiques qui se matérialisent sur des acteurs ou des secteurs distincts, à la fois du côté de l'offre et de la demande⁶. C'est notamment l'approche de la Banque Mondiale lorsqu'elle évalue le coût des dommages à travers le modèle MFMOD dans les régions sous sa surveillance⁷. Les dommages sont alors traduits à travers deux canaux exogènes : la productivité des facteurs ou les dépréciations de capital, mais restent intégrés dans des modèles structurels traditionnels avec un nombre limité de secteurs et des comportements d'agents relativement unifiés et homogènes.

De façon plus marginale, la recherche s'est attelée à introduire le coût des dommages dans des modèles internationaux et multisectoriels très granulaires. En 2006, une des premières évaluations multisectorielles s'est reposée sur le modèle statique GTAP-EF et a évalué les effets macroéconomiques de long terme du scénario du GIEC « B1 » sur un champ d'évènements climatiques très ciblés : le tourisme et le niveau de la mer. Si les effets macroéconomiques restent limités, les études ont mis en évidence les effets d'interaction liés à la survenue simultanée de plusieurs évènements et concluaient sur la nécessité d'évaluer le coût des dommages dans une approche d'équilibre général pour ne pas se limiter aux seuls

⁴ Pindyck (2017) critique par exemple la forme des fonctions et des calibrations retenue dans la boucle climatique : « IAM-based analyses of climate policy create a perception of knowledge and precision that is illusory, and can fool policy-makers into thinking that the forecasts the models generate have some kind of scientific legitimacy ».

⁵ Pour un aperçu des effets économiques du changement climatique, on pourra se référer à la méta-analyse publiée par la Direction générale du Trésor (Lancesseur, Labrousse, Valdenaire, & Nakaa, 2020).

⁶ Éventuellement sur des régions distinctes, lorsque les modèles sont multi-pays et permettent de calibrer géographiquement les dommages.

⁷ Voir par exemple l'évaluation du coût des ouragans dans le Caraïbes (Burns, Jooste, & Schwerhoff, 2021) ; ou le coût de la pollution, des rendements agricoles, de la productivité du travail et des inondations au Pakistan (Burns, Jooste, & Schwerhoff, 2021)

coûts directs (Bigano, Bosello, Roson, & Tol, 2006). Plus tard, Eboli (2009) et Bosello (2012) étendent cette approche à des modèles multisectoriels dynamiques, et évaluent l'ensemble des dommages sous-jacents aux scénarios GIEC, ce qui permet d'évaluer la montée des coûts macroéconomiques tout au long du siècle et de tenir compte des effets de bouclage et de rétroaction. Les impacts macroéconomiques estimés restent encore très faibles (et sont parfois même positifs pour les pays européens supposés bénéficier d'une hausse des flux touristiques). De même, certains dommages, bien qu'ayant des effets négatifs directs sur l'activité européenne, pénalisaient davantage les autres régions et pouvaient donc améliorer les termes de l'échange et la compétitivité de la France (c'est notamment le cas des baisses de rendements agricoles).

Dans le cadre du projet européen « PESETA », les chercheurs du Joint Research Center évaluent les impacts sur chaque pays européen d'un ensemble très large de dommages climatiques. Les fonctions de dommages mobilisées sont reconstruites à partir d'une méthodologie harmonisée et d'une base large de données climatiques et économiques. Ce projet permet donc de tenir compte des effets d'interaction à un niveau très granulaire et une comparaison claire et transparente des impacts mesurés. Les résultats tendaient toutefois à sous-estimer le coût du changement climatique (-1,1 pt de PIB, perte essentiellement liée à la productivité au travail, au niveau de la mer et aux rendements agricoles). La difficulté relevée, liée à la structure économique centrée sur l'Europe, était de ne pas tenir compte du coût indirect des dommages survenant dans le reste du monde et transitant par le commerce extérieur (Ciscar Martinez & al., 2014).

Tableau 2 : Revue des impacts macroéconomiques des risques physiques en Europe issus de l'approche « bottom-up »

Étude	Modèle	Scénario	Dommages étudiés	Effets macroéconomiques
Deke et al. (2001)	DART MEGC Monde dynamique multi-pays multisectoriel	Scénario B (IPCC II) Scénario "Back-to-Coal"	Rendements agricoles Niveau de la mer	+0,5% de production agricole -0,1% des autres productions 2 pt de PIB à consacrer à l'adaptation
Bosello et al. (2004)	GTAP-EF MEGC Monde statique multi-pays multisectoriel	Scénario B1 (IPCC II)	Maladies vectorielles	-0,7 pt de PIB
Bosello et al. (2004)	GTAP-EF	Scénario B1 (IPCC II)	Niveau de la mer	-0,001 pt de PIB
Berritella et al. (2004)	GTAP-EF	Scénario B1 (IPCC II)	Tourisme	-0,1 pt de PIB
Bigano et al. (2006)	GTAP-EF	Scénario B1 (IPCC II)	Niveau de la mer Tourisme	-0,1 pt de PIB
Eboli et al. (2009)	ICES MEGC Monde dynamique multisectoriel multi-pays	Scénarios A1B, A2, B1 (IPCC 2007)	Santé et productivité Rendements agricoles Tourisme Demande énergétique Niveau de la mer	+0,2 pt de PIB
Roson (2010)	ENVISAGE MEGC Monde dynamique multi-pays multisectoriel avec module climatique	Scénario de réchauffement endogène (+4,8 °C en 2100)	Niveau de la mer Rendements agricoles Disponibilités de l'eau Santé Tourisme Demande énergétique	+0,5 pt de PIB (2050) +1,2 pt de PIB (2100)

Ciscar et al. (2011)	GEM-E3 Europe	4 scénarios à horizon 2080 2,5 °C 3,9 °C 4,1 °C 5,4 °C	Rendements agricoles Niveau de la mer Inondations côtières Inondations fluviales Tourismes Santé	< -1 pt de PIB en 2080 (de 20 Md€ (2.5 °C) à 65 Md€ (5.4 °C) de pertes de PIB)
Bosello et al. (2012)	ICES	Scénario A1B (IPCC)	Niveau de la mer Tourisme Rendements agricoles Demande énergétique Inondations fluviales Productivité au travail Productivité des forêts	-0,15 pt de PIB
Aaheim et al. (2012)	MEGC	Scénarios +2°C et +4°C	Évènements extrêmes Rendements agricoles et sylvicoles Production électrique Demande énergétique Niveau de la mer Santé Tourisme	Jusqu'à -0,7 pt de PIB (2080)

Note: Dans l'ensemble, les impacts des scénarios sont évalués par rapport à un scénario contrefactuel théorique « sans changement climatique ». Les impacts macroéconomiques sont présentés en 2050 pour l'Europe ou des ensembles proches (UE, Europe occidentale ou Europe du Sud) incluant la France. Les évaluations sont parfois affinées jusqu'en 2100 ou détaillées spécifiquement pour la France.

Étude	Modèle	Scénario	Domages étudiés	Effets macroéconomiques
Ciscar et al. (2014)	<u>GEM-E3</u> MEGC Europe dynamique multi-pays multisectoriel	Scénario A1B (IPCC)	Rendements agricoles Demande énergétique Feux de forêt Niveau de la mer Tourisme Santé	-1,1 pt de PIB
OCDE (2015)	<u>ENV-Linkages</u> MEGC Monde dynamique multi-pays multisectoriel	Scénario A1B (IPCC) et RCP 8.5	Evènements extrêmes Rendements agricoles et sylvicoles Niveau de la mer Santé Demande énergétique Tourisme	-0,5 pt de PIB (2060)
Roson et Sartori (2016)	Fonctions de dommages basées sur GTAP	Hausse de température de +3°C	Niveau de la mer Rendements agricoles Productivité au travail Santé Tourisme	France 0 pt de PIB +0,0002 pt de PIB 0 pt de PIB +0,0501 pt de PIB -0,3515 pt de PIB -0,30 pt de PIB au total
Kompas et al. (2018)	<u>GTAP-INT</u> Modèle d'équilibre général intertemporel Monde multi-pays multisectoriel	Scénarios RCP 2.6/4.5/6.0/8.5	Rendements agricoles Niveau de la mer Productivité du travail Tourisme Demande énergétique Stress hydrique	de -0,139 pt de PIB (+1°C) à -0,662 pt de PIB (+4 °C)
Lafakis (2019)	<u>Moody's Analytics Global Macroeconomic Model</u> Modèle structurel multi-pays	Scénarios RCP 2.6/4.5/6.0/8.5	Niveau de la mer Santé Productivité du travail Rendements agricoles Tourisme Demande énergétique	France +0,1 pt de PIB

Note : Dans l'ensemble, les impacts des scénarios sont évalués par rapport à un scénario contrefactuel théorique « sans changement climatique ». Les impacts macroéconomiques sont présentés en 2050 pour l'Europe ou des ensembles proches (UE, Europe occidentale ou Europe du Sud) incluant la France. Les évaluations sont parfois affinées jusqu'en 2100 ou spécifiquement pour la France.

Il apparaît toutefois aux chercheurs que l'approche de la modélisation "bottom-up" (dont les principaux résultats sont présentés dans le Tableau 2) permet de retracer précisément et dans le temps la manière dont les effets du changement climatique impacteraient l'économie, ainsi que de tenir compte des effets de rétroaction et des effets de second-tour, comme l'évolution des prix-relatifs (Roson & Sartori, 2015). Plus récemment, certaines institutions financières comme Moody's ont poursuivi ces travaux en intégrant les coûts des dommages dans des modèles macroéconomiques privés mais continuent toutefois de sous-estimer les coûts du changement climatique dans les pays du Nord, qui bénéficieraient de baisses de productivité plus limitées, mais de flux touristiques plus importants et de prix du pétrole plus faibles (Lafakis, Ratz, Fazio, & Cosma, 2019).

1.3. Adaptation du modèle Three-ME aux risques climatiques

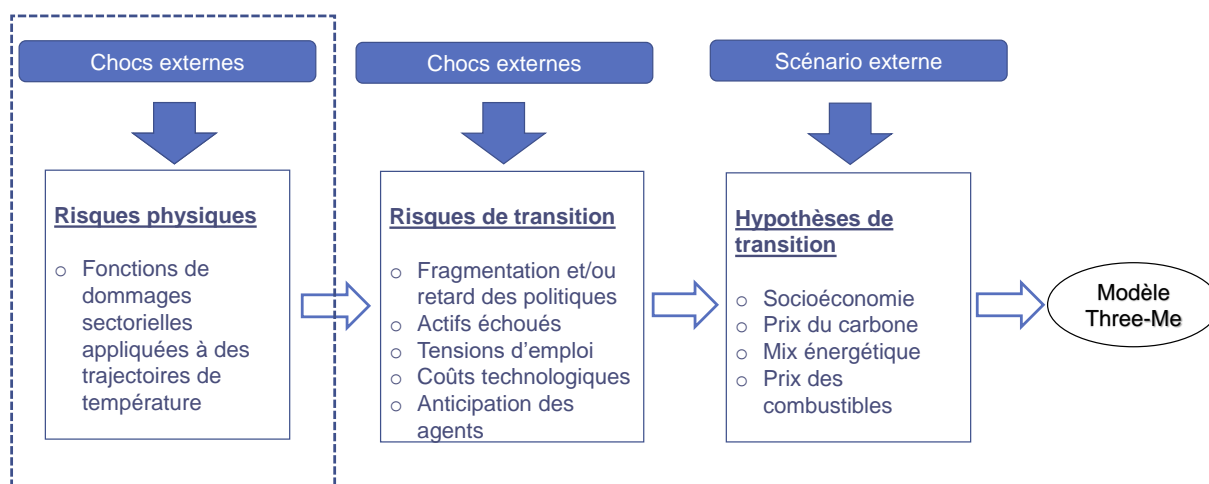
Pour évaluer l'impact des risques climatiques, l'ADEME a procédé à plusieurs simulations à partir de la troisième version de « Three-ME » (Modèle Macroéconomique Multisectoriel pour l'Evaluation des politiques Energétiques et Environnementales⁸). Ce modèle d'équilibre général calculable (MEGC) représente, à une fréquence annuelle, la dynamique de l'économie française par un système complet et cohérent d'agrégats économiques et sectoriels. D'inspiration keynésienne, ses prix ne s'y ajustent pas instantanément pour équilibrer l'offre et la demande sur les marchés, ce qui rend compte de l'existence de déséquilibres transitoires et permanents (et notamment d'un chômage involontaire sur le marché du travail) et la possibilité d'effets multiplicateurs keynésiens à court, moyen ou long terme. L'offre de monnaie y dépend de la politique monétaire qui fixe le taux d'intérêt, à la différence du cadre walrassien où celui-ci est déterminé par la confrontation offre-demande de capital. Ainsi, les investissements y sont financés par création monétaire, sans nécessairement entraîner une hausse du taux d'intérêt qui conduirait à évincer totalement la demande en investissements des autres secteurs de l'économie.

Il permet une représentation fine de l'économie française pour analyser les effets des transferts d'activité d'un secteur à un autre en termes d'emploi, d'investissement ou d'importations. La dernière version comprend 33 secteurs productifs (produisant 28 commodités), distinguant 13 secteurs énergétiques. Leur production est représentée par une fonction dite « CES » généralisée, qui permet aux entreprises trois arbitrages pour minimiser leurs coûts : entre les différents facteurs de production (capital, travail, énergie, biens intermédiaires), entre les différents types de biens et les différents vecteurs énergétiques (le mix électrique étant exogène) et entre les produits domestiques et les produits importés.

Enfin, le modèle associe un bloc macroéconomique à une approche technico-économique permettant de calculer la demande énergétique des ménages, ce qui en fait un modèle « hybride ». Les besoins en énergie évoluent en fonction des besoins de transport et de chauffage et selon les performances énergétiques du parc immobilier et automobile. Les ménages réalisent des arbitrages entre diverses classes énergétiques de bâtiments et de véhicules en fonction de leurs coûts d'usage respectifs. Le reste de la consommation est modélisé par une fonction d'utilité de type « Linear Expenditure System » (LES) généralisée qui tient compte d'une consommation incompressible et d'un arbitrage entre les autres biens.

L'objectif de l'étude est d'adapter le modèle pour lui faire représenter l'ensemble des risques climatiques qui peuvent se manifester pendant un scénario de transition. Les risques de transition ont pu être spécifiquement traités dans des travaux antérieurs (Boitier, et al., 2023), mais les risques physiques posent un ensemble de questions de modélisation et de calibrations qu'il convient de traiter en amont des scénarios.

Figure 1 : Méthodologie de modélisation macroéconomique des risques climatiques



Source : auteurs.

⁸ La présentation du modèle est disponible à l'adresse <https://www.threeme.org>

Pour la spécificité de cet exercice et la mesure des risques physiques, plusieurs modifications significatives ont été apportées au modèle. À l'origine, celui-ci s'appuie sur un cadre « néo-keynésien » où l'activité découle des comportements de demande des agents économiques : consommation, investissement, exportation notamment. Pour que le cadre comptable reste cohérent, le modèle assure à chaque période un équilibre entre l'offre (productions et importations) et sa demande agrégée : c'est l'équilibre « ressources-emplois », qui permet alors de reconstituer les principaux agrégats de la comptabilité nationale associée au tableau « entrées-sorties ».

Dans ce cadre comportemental, c'est la production qui s'ajuste instantanément à la demande agrégée. La hausse des revenus générés rétroagit alors sur la demande⁹, via la nouvelle demande en travail des entreprises, de nouveaux salaires découlant des nouveaux rapports de force entre salariés et entreprises et une nouvelle demande en capital découlant des anticipations de demande agrégée par les entreprises. Deux hypothèses traditionnelles sont alors partiellement mises en défaut dans l'évaluation des risques climatiques :

- Les contraintes physiques sur la production : dans la version originale de ThreeME, la variation de la production résulte uniquement de l'évolution de la demande intérieure ou extérieure et d'éventuels chocs exogènes affectant les coûts de production (prix des consommations intermédiaires, hausse de la fiscalité...). Contrairement aux modèles d'équilibre général néoclassiques, où les quantités produites dépendent de la disponibilité des facteurs de production, les modèles néo-keynésiens prennent mal en compte les effets récessifs qui pourraient résulter d'une contraction de la quantité de facteurs de production disponibles (travail, capital, ressources naturelles, etc.) D'autre part, l'ensemble des facteurs de production « réels » n'est pas intégré ; par exemple, dans le cas de l'agriculture, le facteur « utilisation des sols » n'est pas pris en compte, alors qu'il est un facteur limitant de la production ;
- Les déterminants de l'inflation : Dans ThreeME, l'inflation est essentiellement influencée par le prix des facteurs (« inflation par les coûts »), alors que sur certains marchés, notamment les marchés des matières premières ou de l'énergie, elle réagit et s'ajuste rapidement aux déséquilibres directs entre l'offre et la demande (« inflation par la demande »).

À l'inverse, ces deux phénomènes sont pris en compte dans les modèles d'équilibre général walrassien, associés à une représentation statique de l'économie : l'offre y est essentiellement prédéterminée par la quantité de facteurs de production disponibles. Par conséquent l'ajustement offre/demande est essentiellement nominal et s'opère grâce à la variation instantanée des prix : toute évolution non anticipée des volumes se traduit donc par la fixation d'un nouveau prix d'équilibre. Au contraire, les outils macroéconométriques, ou les modèles néo-keynésiens, comme le modèle Mésange codéveloppé par l'Insee et la DG Trésor (2017), prévoient que l'offre s'ajuste à la demande pour un prix donné, plus ou moins flexible. L'équilibre s'opère donc essentiellement par une variations des quantités produites. On parle d'ajustement par les volumes¹⁰.

L'hypothèse selon laquelle l'offre s'ajuste à la demande dans le cadre de prix relativement rigides ne permet pas de simuler la totalité des impacts du changement climatique. En effet, les risques physiques transiteraient essentiellement par deux canaux : des dommages directs au actifs physiques (à travers, par exemple, une hausse de la dépréciation du capital) et une perturbation des facteurs de production (via une baisse de la productivité des facteurs travail et capital). Lorsque l'un ou l'autre se produit, les modèles keynésiens représentent deux phénomènes :

- D'une part, les coûts unitaires de production augmentent, l'utilisation du facteur étant elle-même devenue plus onéreuse et les entreprises reportant progressivement cette hausse à leurs prix de vente (sous l'hypothèse d'une absence de comportement de marge à long terme) ;
- D'autre part, la demande en facteur « efficient » augmente afin de compenser la moindre productivité des facteurs déjà employés.

Dans le cas d'une baisse de la productivité des facteurs de production, il se produit un « effet rebond » à court terme : avant d'ajuster leurs prix à la hausse, les entreprises touchées créent de nouveaux emplois

⁹ C'est pourquoi on parle, plutôt que de modèle de demande, de modèle « OA-DA » (offre agrégée – demande agrégée).

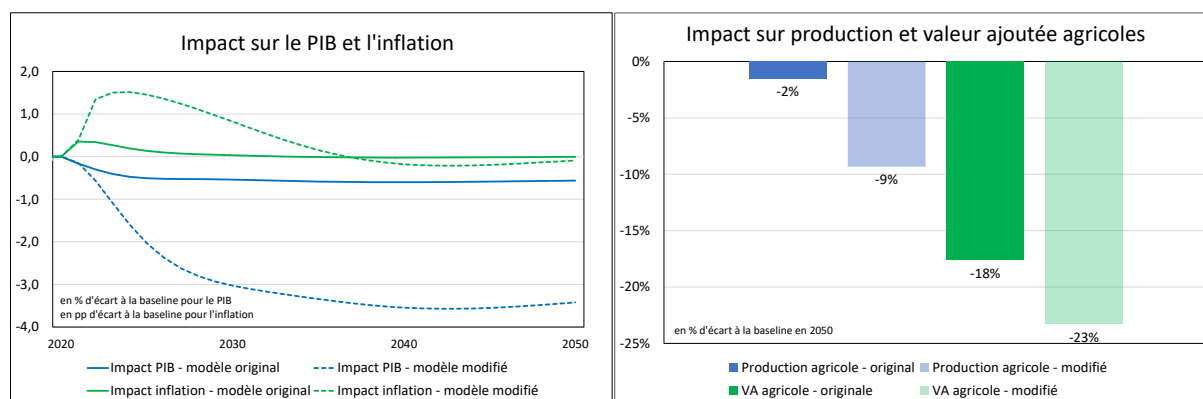
¹⁰ C'est cette hypothèse qui rend par ailleurs possible l'observation d'effets d'entraînement sur les volumes et une potentielle efficacité des politiques de relance budgétaire, qualifiés d' « effets keynésiens ».

et réalisent de nouveaux investissements pour assurer la demande de court terme. Cet effet, réaliste dans les secteurs traditionnels, est peu pertinent dans le secteur agricole : dans le cas où les espaces cultivables disponibles sont limités, la moindre productivité des sols associée aux hausses de températures se traduira par une limitation directe des capacités de production (et donc de la production). Plus généralement, ce sont l'ensemble des services écosystémiques qu'il conviendrait de modéliser dans la production de chaque secteur. Ici, ces services peuvent être considérés comme des facteurs de Leontief dont le niveau détermine directement le niveau de production, et leur rareté ne peut être compensée par une substitution ou l'apport d'un autre facteur.

Dans le secteur de la production agricole, la hausse des températures moyennes s'accompagnera d'une baisse des rendements des principales cultures (blé et maïs notamment), en France et dans le monde. Toutefois, les producteurs ne seraient pas en mesure de contrebalancer la baisse anticipée des volumes. La production sera alors limitée par la baisse de la fertilité des sols et ne pourra pas être rehaussée (en augmentant les surfaces cultivables à court terme par exemple). Comme le montrent les figures ci-dessous, le cadre traditionnel d'offre-demande agrégée (« modèle original ») tend à minimiser les coûts des dommages, à la fois parce qu'il permet un ajustement de la production à court terme (via des créations d'emplois et des investissements additionnels), mais aussi car les hausses de prix sont lissées du fait des délais d'ajustement et des rigidités nominales (le temps que le secteur agricole intègre la hausse de ses coûts de production à ses prix de vente). C'est pourquoi la modification de la branche sectorielle agricole est justifiée¹¹, ce qui permet une modélisation de la production corrélée avec les rendements réels et une inflation plus réaliste avec ce qui se passe dans l'économie réelle (« modèle modifié »), par exemple pendant les épisodes de sécheresse estivale.

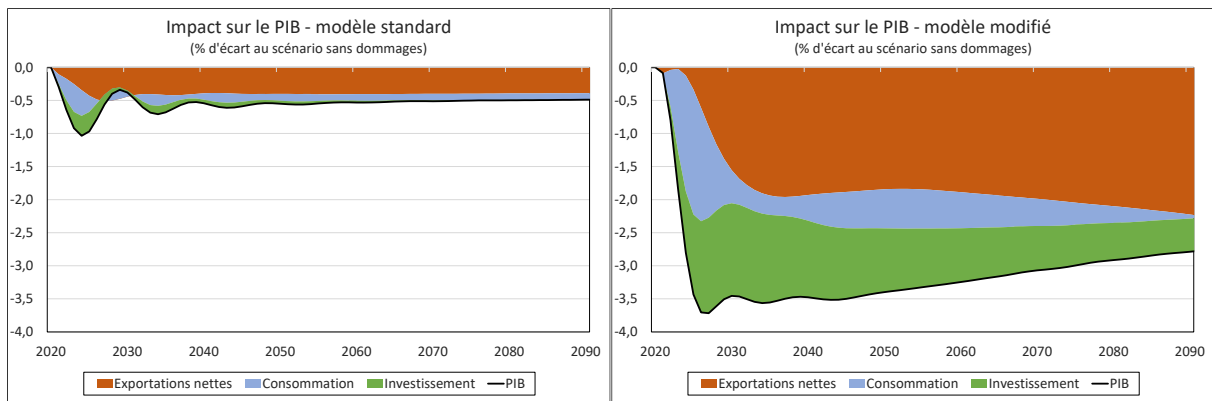
De même, le secteur de la production d'électricité voit ses capacités et ses prix affectés d'une manière similaire, du fait de sa dépendance à la disponibilité de l'eau (refroidissement des centrales nucléaires, débit des barrages hydroélectriques), de puissance de rayonnement solaire et de vitesse des vents¹². Comme le modèle Three-ME représente au total neuf secteurs de production d'électricité distincts produisant un même bien, il est ici supposé que le nouveau prix d'équilibre est fixé par la confrontation entre l'offre et la demande globale d'électricité, et sera réimputé par l'ensemble des filières (les filières moins touchées par le changement climatique profitant alors d'un effet d'aubaine pour augmenter leurs marges).

Figure 2 : Impact macroéconomique et sectoriel d'une baisse des rendements agricoles de 10 %



¹¹ Le secteur « alimentation » étant majoritairement dépendant de la production agricole, on suppose que son offre est amputée par la baisse des rendements et que ses prix réagissent à très court terme à la hausse des coûts de ses intrants.

¹² Pour comprendre les liens entre écosystèmes et rendements électriques, voir par exemple Tobin et al. (2018).



Source : modèle Three-ME, selon le modèle original (branche agricole d'équilibre offre-demande par les volumes) ou la version modifiée (équilibre par les prix).

Parmi les 32 secteurs, les deux secteurs de l'agriculture et des biens alimentaires voient donc une nouvelle structure de production et de consommation. Au lieu d'une structure « keynésienne » traditionnelle, selon laquelle, entre l'offre et la demande, c'est la demande qui est le volume limitant et qui contraint l'offre, c'est désormais la consommation effective qui doit s'ajuster à l'offre via une hausse des prix (cf. Encadré 2). La consommation effective d'un bien n'est donc pas seulement limitée par les revenus disponibles mais aussi par les contraintes pesant sur les capacités de production. Toutefois, l'alimentation étant une consommation de première nécessité, il est supposé que les importations (plus chères) viennent compenser les baisses subies de production. Parallèlement, deux fonctions de production spécifiques assurent une production cohérente avec les rendements réels¹³ et la disponibilité des facteurs. Les équilibres comptables n'assurent plus un ajustement instantané des volumes, mais celui d'un nouveau prix d'équilibre qui évolue directement en fonction des offres et demandes agricoles respectives. D'autre part, l'alimentation reste considérée comme un bien de première nécessité, et sa consommation contrainte par les ménages est peu dépendante des prix observés¹⁴ : toute variation du panier alimentaire en valeur se ressentira donc nécessairement par des ajustements de la consommation générale.

Une baisse instantanée et pérenne des rendements agricoles de 10 % (soit une baisse de la productivité de chaque facteur de production du secteur) est simulée et ses effets sont comparés avec le modèle original afin de valider la nouvelle méthodologie (cf. Figure 2). La production agricole chute instantanément de 10 % et la hausse des prix des produits agricoles est soudaine et brutale. L'effet inflationniste global est bien supérieur dans la nouvelle version du modèle (plus d'un point d'inflation additionnelle à court et moyen terme), l'ajustement étant plus rapide, passant totalement par les prix (et plus par les volumes). L'inflation se transmet davantage aux autres prix de production et aux salaires, ce qui génère une boucle inflationniste prix-salaires et maintient l'inflation durablement au-dessus de sa trajectoire tendancielle. À long terme, la baisse d'activité et les destructions d'emplois limitent les progressions salariales et finissent par diminuer l'inflation.

La hausse des prix pèse sur la consommation totale des agents, qui sont contraints de consacrer une part plus importante de leur revenu pour l'alimentation au détriment des autres biens et services. Les exportations subissent également un recul, compensés toutefois par des effets de hausses de prix similaires chez les partenaires commerciaux français. Confronté à des restrictions des ménages, le secteur des services voit une baisse significative de la demande qui lui est adressée et devient une victime « indirecte » du changement climatique dans ces secteurs. Au final, la baisse d'activité est plus importante (-3,5 points de PIB à long terme dans la version modifiée, contre -0,5 point au départ). Au niveau sectoriel, la baisse de la valeur ajoutée agricole est plus marquée et, l'inflation se transmettant davantage à l'ensemble de l'économie, l'impact s'étend davantage aux autres secteurs d'activité, en particulier les biens et services non essentiels consommés par les ménages.

¹³ On suppose néanmoins que la production agricole, en l'absence de changement climatique, évoluerait en projection suivant la démographie française, de telle façon à maintenir stable la consommation alimentaire par tête.

¹⁴ Les élasticité-prix et élasticité-revenus de la consommation en biens agricoles et alimentaires sont en pratique proches de zéro.

Ces impacts significatifs sur l'ensemble de l'économie sont en ligne avec les résultats de la littérature : par exemple, Reilly (2012) note que les effets macroéconomiques sont plus larges que les seuls effets sur la production agricole, car la consommation est très inélastique et nécessite que les ressources des autres secteurs (travail, capital, biens intermédiaires) soient prélevées pour assurer en priorité la demande alimentaire.

À notre connaissance, cette nouvelle structure originale d'un modèle macroéconomique, combinant à la fois des structures keynésiennes et walrassiennes est la première de ce type parmi les modèles utilisés par les institutions françaises. En règle générale, la structure théorique du modèle, qui conditionne le comportement des agents, est fixée à l'origine par le modélisateur¹⁵ et est souvent reproduit à l'identique d'une filière à l'autre¹⁶ (comme c'est le cas dans la version « originale » de Three-ME).

En projection, la modélisation continue de s'appuyer sur une trajectoire de hausse tendancielle de l'activité suivant le sentier de croissance néo-classique (Solow, 1956) assuré par la croissance de la population active et les gains de productivité du travail ; cette étude ne remet pas en cause l'hypothèse de croissance exogène, sous-jacente aux projections de l'ADEME, assurant une croissance continue des volumes et du revenu réel des agents. Il est probable que les risques physiques pourraient pénaliser les gains de productivité anticipés et peser davantage sur les trajectoires macroéconomiques, par exemple en affectant à la baisse le stock de capital, en particulier dans les secteurs où il existe des rendements d'échelle croissants. Des travaux futurs pourront approfondir les risques physiques dans des modèles de croissance endogène ; la modélisation de la production, en intégrant des ressources non-renouvelables (ex : matières premières rares) ou du capital naturel (ex : utilisation des sols, dépendance à des services écosystémiques) ; ou les effets plus larges des risques climatiques sur la recomposition de l'économie et les gains de productivité.

Au-delà de l'évaluation des risques climatiques, qui ouvre un champ nouveau à la recherche économique, une telle hybridation des comportements apparaît comme une nouveauté de modélisation et les résultats observés confirment, au travers des échanges entre modélisateurs, que les hypothèses structurelles jouent un rôle essentiel dans les exercices de prospective et sur la représentation des différents chocs macroéconomiques considérés (Jacquetin, 2021). Ils invitent à considérer la modélisation comme une source d'incertitude au moins aussi forte que celle des hypothèses de transition et des effets climatiques. La large variabilité des résultats observés pour un même scénario invite à la prudence, notamment si ces méthodes doivent prochainement s'étendre à la réglementation prudentielle et à la gestion des risques du secteur financier. Plus que des signaux de « bonne pratique », les choix de modélisation pourraient alors directement influencer les décisions d'investissement et de crédit, ainsi que la gestion des risques du secteur financier.

Encadré 2 : La nouvelle dynamique de production et d'inflation dans la branche agricole

Dans les modèles néokeynésiens usuels, la production du bien Y_i s'ajuste à la demande D_i et aux imports M_i , et le prix de vente est égal à une marge μ appliquée au coût unitaire de production CU_i . On parle de modèle « offre agrégée – demande agrégée » et d'« inflation par les coûts » :

$$Y_i + M_i = D_i$$

$$P_{Y_i} = \mu CU_i = \mu (\alpha_{L,i} cl_{L,i} + \alpha_{K,i} ck_{K,i} + \alpha_{E,i} ce_{E,i} + \alpha_{mat,i} cmat_{mat,i})$$

$\alpha_{f,i}$: part de la rémunération nominale du facteur f dans le secteur i

$cf_{f,i}$: coût unitaire du facteur f dans le secteur i

Cette dynamique est modifiée pour le secteur agricole. On introduit une production potentielle Y_{pot} et des importations potentielles M_{pot} de produits agricoles qui sont contraintes et dépendent de l'évolution de la productivité des facteurs, supposée exogène.

¹⁵ Cela exclut évidemment les modèles purement statistiques. Les modèles macroéconométriques reposent en partie sur les données mais leur trajectoire de long terme découle d'un cadre théorique combinant macroéconomie et microéconomie.

¹⁶ Les différents paramètres, estimés ou calibrés, peuvent néanmoins différer selon les types de secteur ou de bien considérés.

$$\dot{Y}_{pot_i} = d\log(\text{prog}_i) + d\log(\text{pop}) \quad \text{et} \quad \dot{M}_{pot_i} = d\log(\text{prog}_i) + d\log(\text{pop})$$

L'équilibre entre offre et demande ne s'opère plus par les quantités mais par les prix. Le prix d'équilibre PY_{eq_i} des biens produits domestiquement est égal à :

$$PY_{eq_i} Y_{pot_i} + Tax_i + Marg_i = PD_i \cdot QD_i$$

Le prix d'équilibre PM_{eq_i} des biens importés est égal à :

$$PM_{eq_i} M_{pot_i} + Tax_i + Marg_i = PM_i \cdot QM_i$$

Avec QD la demande de produits domestiques i (c'est la somme des consommations intermédiaires et finales adressées aux producteurs domestiques), QM la demande en produits i adressée au reste du monde, Tax les taxes à la consommation et $Marg$ les marges de transport et de commerce.

Le prix de production ne dépend plus des coûts de production mais du nouveau prix d'équilibre :

$$P_{Y_i} = \mu CU_i \quad \text{devient} : \dot{P}_{Y_i} = PY_{eq_i}$$

PM_i autrefois supposé exogène devient $PM_i = PM_{eq_i}$.

La consommation finale CF est fonction de la population pop , des revenus R et des prix de consommation P :

$$\dot{CF}_i = \rho \dot{p} + \alpha \dot{R} - \beta \dot{P}_i \quad (\alpha, \beta \text{ des paramètres})$$

Les consommations intermédiaires CI de produits agricoles i par les secteurs j évoluent comme la production des secteurs, mais diminuent relativement lorsque leurs prix réels $(\dot{P}_j - \dot{P}_i)$ augmentent :

$$\dot{CI}_{ij} = \dot{Y}_j + \gamma (\dot{P}_j - \dot{P}_i) \quad (\gamma \text{ un paramètre})$$

Les imports M augmentent comme la demande D et décroissent lorsque leurs prix P_m augmentent plus vite que les prix domestiques P_i :

$$\dot{M}_i = \dot{D}_i + \gamma' (\dot{P}_i - \dot{P}_m) \quad (\gamma' \text{ un paramètre})$$

Ainsi, la demande s'ajuste au niveau de l'offre potentielle via l'augmentation des prix de marché. Cette spécification permet de simuler une baisse effective des rendements et de la production domestique agricole, sans hausse de l'investissement et de l'emploi sectoriels, et une hausse des prix de marché agricoles, potentiellement supérieure à la hausse des coûts unitaires de production, qui aura un effet d'éviction sur la consommation des autres produits et un effet plus négatif sur la balance commerciale.

2. Estimation d'une fonction de dommages en France

2.1. Impacts sectoriels retenus

Comme détaillée en section 1, l'introduction des coûts du changement climatique dans les modèles macroéconomiques est ancienne et remonte au premier modèle d'évaluation intégrée (IAM) réalisé par William Nordhaus (1991). Dans l'approche originelle, la fonction de production est amputée à la fois d'une fraction économique liée au coût d'abattement des émissions et une fonction de dommages liés au dégâts causés par le réchauffement planétaire. Le modèle vise alors à produire une trajectoire de prix du carbone optimale destinée à minimiser le total des coûts. Les fonctions de dommages ont fait l'objet d'une recherche et d'un long prolongement dans la même littérature. Mais en parallèle, elles ont fait l'objet d'une critique manifeste par la communauté scientifique, qui affirme que leur base théorique et

empirique est trop simpliste et trop peu fondée, en particulier dans le cas des fonctions agrégées (Pindyck, 2017).

De nombreuses approches complémentaires ont alors vu le jour, destinées à repréciser ou recalibrer ces fonctions de dommages. Elles ont pu être estimées au niveau agrégé par des méthodes plus ou moins fondées scientifiquement (jugement ad-hoc, méta-analyses ou économétrie de panel¹⁷). En particulier, certaines modélisations multisectorielles ont retenu une approche désagrégée et exogène, dite « bottom-up » pour intégrer les dommages à un niveau granulaire et en additionnant ces dommages dans un modèle d'équilibre général calculable multisectoriel.

C'est ici l'approche retenue par l'ADEME, qui s'appuie sur les travaux académiques pour documenter sa méthodologie. Elle vise à décliner, à travers des recensements localisés et sectoriels, les impacts monétaires du changement climatique selon différents scénarios du GIEC et à extrapoler des fonctions de dommages sectorielles qui se matérialiseraient à travers des canaux économiques précis. Elle exclut les effets indirects du changement climatique (comme les déplacements de population) ou les politiques d'adaptation ou de reconstruction, qui dépendent des choix des agents (si les actifs endommagés sont modélisés comme essentiels) et des choix politiques et qui compliqueraient l'évaluation du coût direct.¹⁸

Un recensement précis de la littérature académique et des rapports des institutions gouvernementales ou internationales a, dans un premier temps, permis de cibler les principaux canaux d'impact physique dont on estime qu'ils auront un effet significatif au niveau macroéconomique. Les principales fonctions contribuant aux impacts sont précisées ci-dessous (cf. Tableau 3). À notre connaissance, ce recensement prend en compte la plupart des risques identifiés dans les classifications internationales (voir par exemple le tableau de la taxonomie, cf. Tableau 4). De plus, l'ADEME distingue spécifiquement les risques aigus (qui se matérialisent par des événements de courte durée, de fréquence et d'intensité variables) et les risques chroniques (qui se matérialisent par des évolutions progressives d'événements périodiques déjà existants).

Impacts non retenus : les impacts directs

Le recensement de l'ADEME faisait apparaître d'autres sources potentielles et significatives de risques macroéconomiques. Par exemple, la hausse de l'intensité et de la fréquence des catastrophes naturelles comme les feux de forêt (bien que ces derniers soient en théorie inclus dans l'historique des catastrophes naturelles), qui fait anticiper une hausse des dommages au patrimoine forestier et à la biodiversité en France, ainsi qu'une hausse des coûts de gestion par les pouvoirs publics. Il a été décidé de ne pas inclure ces coûts financiers additionnels, estimés à plusieurs milliards d'euros par an : c'est à notre connaissance le seul risque précis de la taxonomie que nous négligeons car il n'a pas été possible d'évaluer le coût économique de la perte de biodiversité. D'autres impacts ont également été investigués, sans pouvoir retenir des estimations suffisamment poussées pour les intégrer aux dommages : les risques montagneux et glissements de terrain (liés au réchauffement du permafrost et à la modification des teneurs respectives en glace et en eau dans le sol) ; en théorie, l'ensemble des risques aigus est pris en compte dans les recensements des catastrophes naturelles ayant touché la France, mais l'évolution des futurs événements et des hausses de leur gravité n'est pas modélisée.

Impacts non retenus : les impacts indirects et l'adaptation

La hausse des migrations climatiques induira des flux de réfugiés dont l'accueil nécessitera une évolution substantielle des politiques publiques. Ce phénomène n'a pas encore été pris en compte faute de connaître la politique migratoire de la France à cet horizon et d'avoir pu chiffrer avec précision et son incidence sur l'évolution de la population et l'offre de travail.

¹⁷ Pour un recensement des méthodes employées, on pourra se référer à Roson et Sortoli (2015) et à leurs travaux multisectoriels.

¹⁸ Les dépenses d'adaptation génèreraient des effets de demande positifs, qui contribueraient à biaiser l'évaluation des dommages. Elles devraient alors être compensées financièrement par l'Etat, et les méthodes employées (hausse d'impôt, économies en dépense) seraient alors beaucoup trop soumises à incertitude. Par exemple, Burns et al. (2021) modélisent les dépenses d'adaptation au Pakistan comme de l'investissement « non productif » qui évinceraient alors de l'investissement « productif ».

Parmi les fonctions de dommages retenues, il ressort que cinq d'entre elles contribueraient essentiellement aux impacts macroéconomiques des risques physiques : la chaîne logistique, les rendements agricoles, la productivité du travail en extérieur et les dégâts liés à la montée du niveau de la mer et aux inondations fluviales. Le coût direct des catastrophes naturelles reste marginal, à la fois parce que leur recensement et leur coût n'est pas exhaustif, mais surtout que la hausse de leur fréquence et de leur dangerosité n'est ici pas modélisée car encore soumise à trop d'incertitudes.

Tableau 3 : Sélection des dommages sectoriels ayant un impact macroéconomique significatif

Fonctions de dommages sectorielles	Choc macroéconomique	Secteurs concernés
Capacités de production hydroélectrique	Productivité des facteurs de production	Électricité - hydraulique
Capacités de production thermique	Productivité des facteurs de production	Électricité - thermique
Catastrophes naturelles	Taux de dépréciation	Immobilier résidentiel et tertiaire
Chaînes logistiques	Demande mondiale	Toute l'économie
Demande énergétique des ménages	Consommation énergétique par m ²	Immobilier résidentiel
Demande énergétique des services	Demande énergétique des entreprises	Services
Élévation du niveau de la mer	Taux de dépréciation	Immobilier résidentiel et tertiaire
Inondations fluviales	Taux de dépréciation	Immobilier résidentiel et tertiaire
Productivité du travail - maladies	Productivité du travail	Toute l'économie
Travail en extérieur	Productivité du travail	Agriculture, Foresterie, Construction
Travail en intérieur	Productivité du travail	Toute l'économie
Rendements éoliens	Productivité des facteurs de production	Électricité - éolien
Rendements photovoltaïques	Productivité des facteurs de production	Électricité - solaire
Rendements agricoles et sylvicoles	Productivité des facteurs de production	Agriculture, Foresterie
Retrait-gonflement des argiles	Taux de dépréciation	Immobilier résidentiel et tertiaire
Revenus du tourisme	Demande mondiale	Services privés

Source : Jacquetin (2021).

Tableau 4 : Classification des risques physiques

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

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

2.2. Calibration de fonctions de dommages « bottom-up »

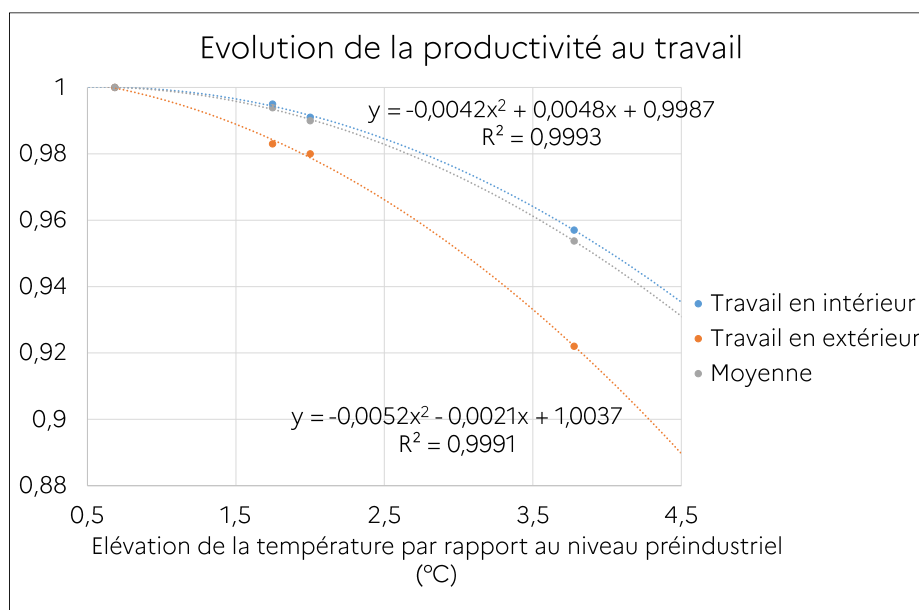
2.2.1. Impact des risques chroniques en France

2.2.1.1. Impacts significatifs: travail extérieur, rendements agricoles, niveau de la mer et inondations

Productivité du travail en extérieur et en intérieur

Il est estimé que la productivité du travail de certains secteurs sera significativement impactée, notamment dans les conditions de travail extérieures (agriculture, construction) et en particulier dans les pays du sud de l'Europe (Gosling, Zaherpour, & Ibarreta, 2018). En l'absence d'adaptation et selon les modélisations d'impacts les plus défavorables, la productivité du travail en extérieur pourrait diminuer de 8 points d'ici la fin du siècle en cas de réchauffement élevé (4 points pour le travail en intérieur).

Figure 3 : Fonction de dommages sectorielle – Température de l'air et productivité du travail

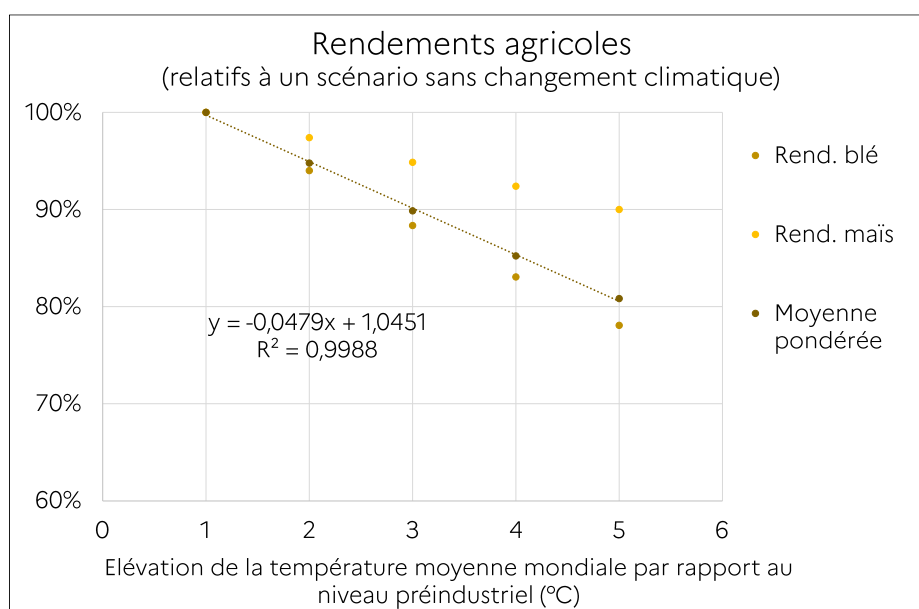


Source : calculs ADEME, d'après Gosling et al. (2018).

Rendements agricoles

À partir de plusieurs approches de simulation et de projection, il est retenu que le rendement des cultures de blé et de maïs est supposé diminuer significativement face à l'élévation de température, hors prise en compte des effets des précipitations (Zhao, et al., 2017). Seuls les effets sur les coûts de production et les prix sont ici retenus. Si les producteurs sont encouragés à accroître leurs capacités pour satisfaire la demande, ils pourront à terme faire face à une contrainte des surfaces disponibles. Si les possibilités d'investissements additionnels sont limitées, cela pourrait contribuer à renforcer le coût économique du réchauffement. Faute d'expertise sur le sujet, les possibilités de substituer les cultures actuelles par des espèces plus résistantes à la chaleur et au stress hydrique n'ont pas été prises en compte.

Figure 4 : Fonction de dommages sectorielle – Rendements agricoles



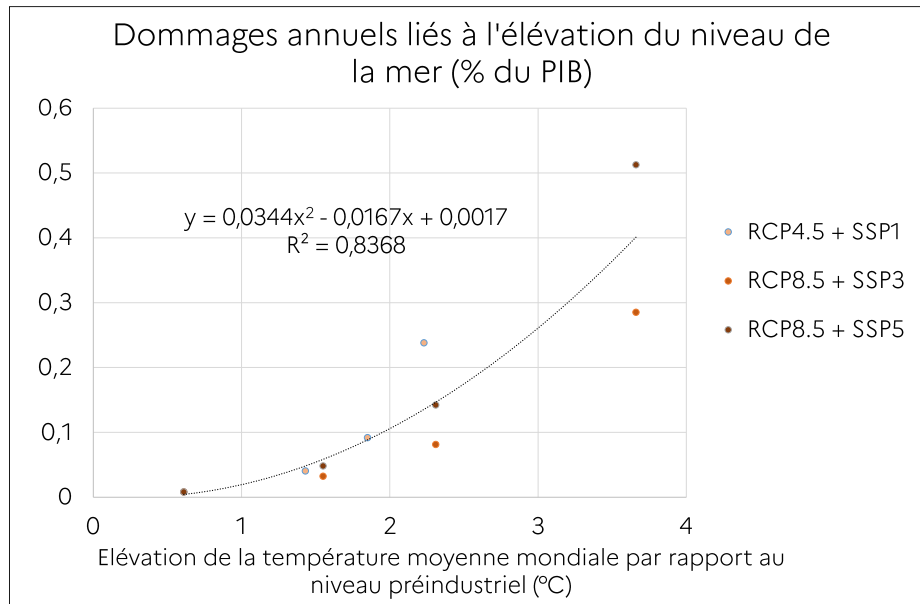
Source : calculs ADEME, d'après Zhao et al. (2017).

Niveau de la mer et inondations

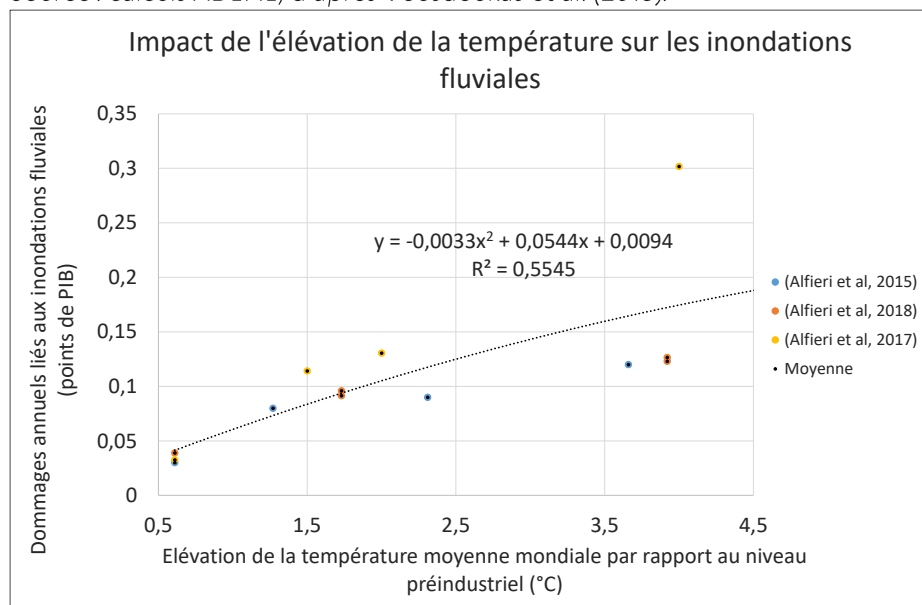
Les projections de la Commission européenne sur l'impact du niveau de la mer et de ses dégâts le long des côtes (effets des marées, vagues et ondes de tempêtes, inondations par submersions marines) indiquent que la France serait un des pays européens les plus touchés économiquement par la montée

des eaux (Vousdoukas, Mentaschi, Voukouvalas, & Feyen, 2019). Les dégâts annuels occasionnés s'élèveraient d'ici la fin siècle de 5 à 10 Md€ selon les scénarios RCP 4.5 et scénarios 8.5 (cf. Figure 5). Les dommages liés aux inondations fluviales et inondations côtières sont issus des travaux d'Alfieri et al.

Figure 5: Fonction de dommages sectorielle – Niveau de la mer



Source : calculs ADEME, d'après Vousdoukas et al. (2019).



Source : calculs ADEME, à partir d'Alfieri et al. (2015, 2017, 2018).

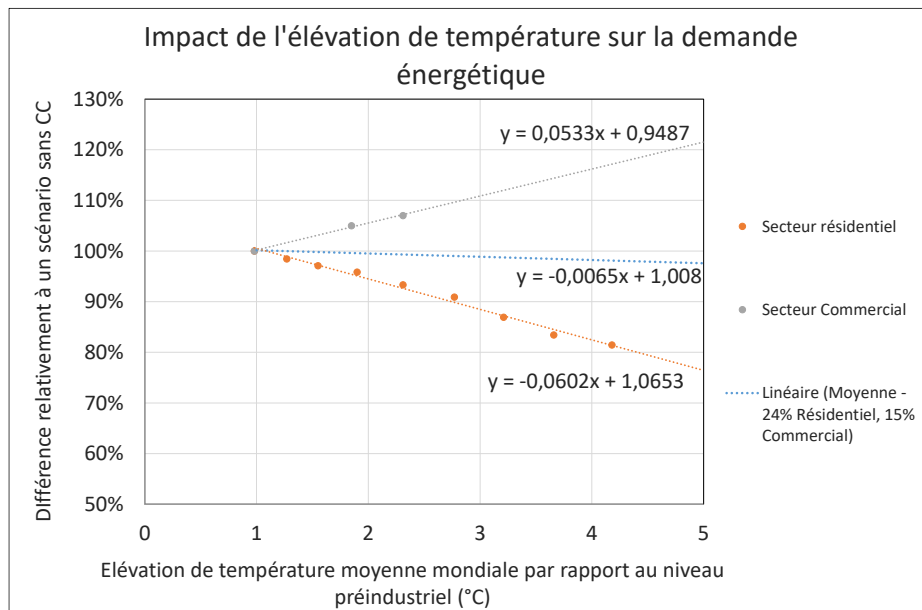
2.2.1.2. Autres risques chroniques

Évolution des besoins de chauffage et de climatisation

L'évolution de la température aura une incidence majeure sur les besoins de climatisation et de chauffage du secteur résidentiel et du secteur tertiaire. Kitous et Després (2018) estiment l'impact de l'évolution de la température sur la demande résidentielle en climatisation et en chauffage par rapport à un scénario où la température n'augmente pas après 2010. De Cian et Sue Wing (2017) estiment l'impact de l'évolution de la température sur les autres secteurs. Ces derniers apparaissent négligeables en France, sauf ceux du secteur commercial, estimé par une fonction linéaire. À partir des poids relatifs de la climatisation et du

chauffage dans la demande énergétique résidentielle, et de la part de la consommation énergétique résidentielle et tertiaire, le coût moyen sur la demande énergétique totale est estimé.

Figure 6 : Fonction de dommages sectorielle – Demande énergétique

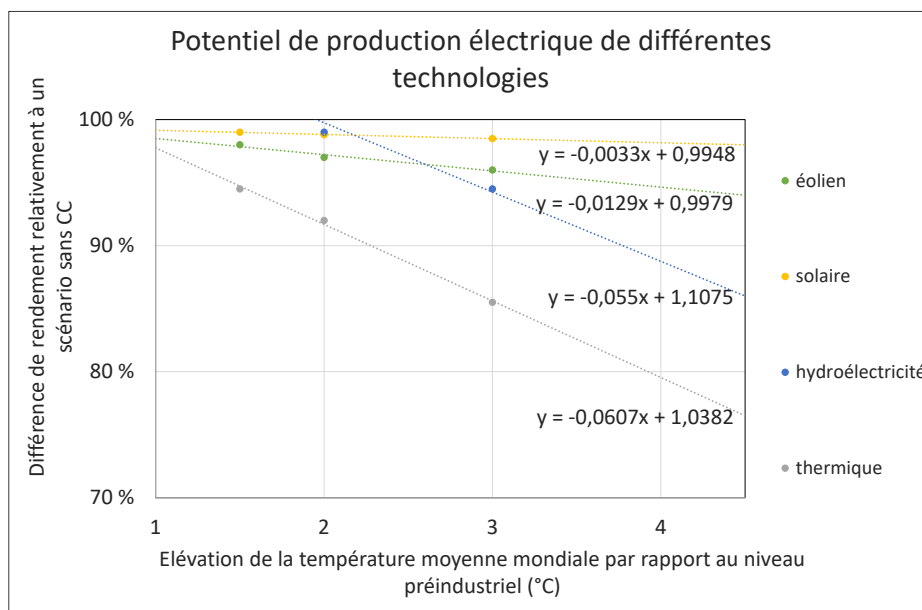


Source : calculs ADEME, d'après Kitous et Després (2018) et Cian et Sue Wing (2017).

Production électrique

Pour quatre technologies de production d'électricité (solaire, éolien, hydroélectrique, thermique), une fonction traduisant l'évolution des rendements par rapport à la période 1971-2000 est estimée à l'aide de Tobin et al. (2018). Les impacts sont plus limités pour la production solaire et éolienne, qui seraient de moins de 10 % dans un scénario d'inaction, tandis que la production hydroélectrique et thermique pourraient diminuer de 20 %).

Figure 7 : Fonction de dommages sectorielle – Production d'électricité

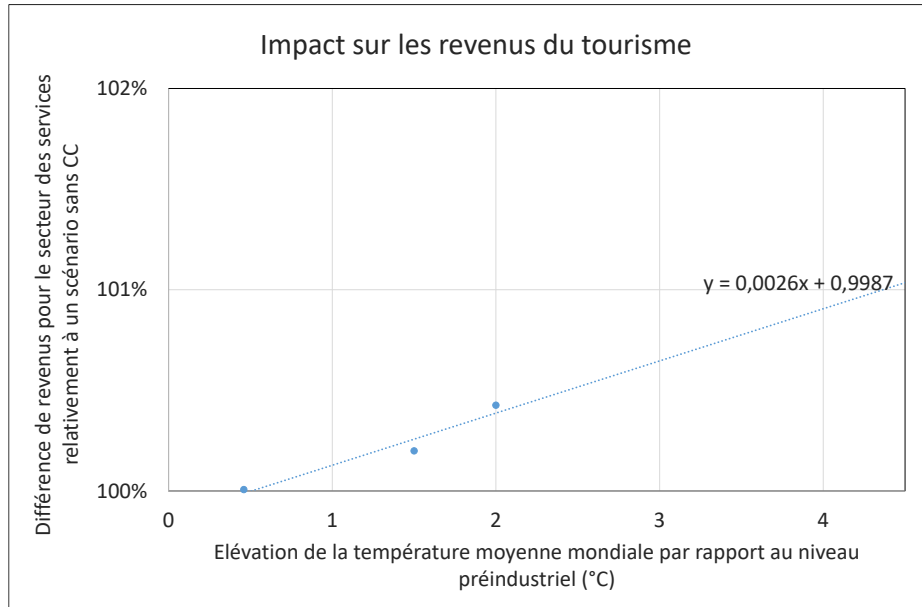


Source : calculs ADEME, d'après Tobin et al. (2018).

Revenus du tourisme

Les effets du changement climatique sont estimés sur le tourisme d'hiver (stations de ski) puis sur le tourisme estival pour obtenir l'impact global sur les revenus du tourisme. On fait l'approximation que la baisse de la demande du tourisme d'hiver est liée à la baisse du nombre de nuitées (Jacob, et al., 2018) et au nombre de remontées de pente (Spandre, et al., 2019). La hausse du tourisme d'été est issue de Jacob et al. (2018).

Figure 8 : Fonction de dommages sectorielle – Demande touristique

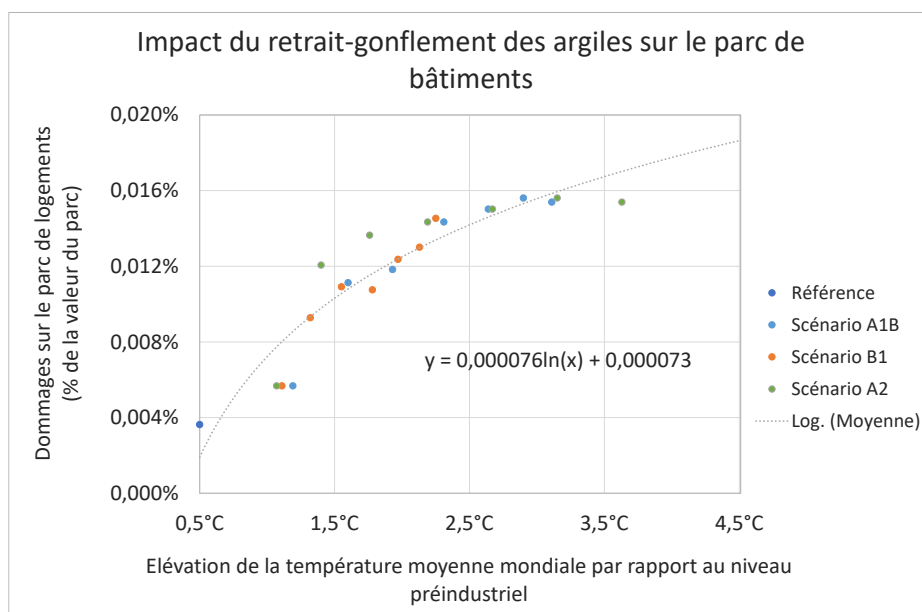


Source : calculs ADEME, d'après Jacob et al. (2018) et Spandre et al. (2019).

Retrait-gonflement des argiles (RGA)

Les estimations sur les dommages liés au RGA sont extraites de Gourdier et Plat (2018). La hausse du coût des dommages dépend d'abord de l'augmentation du nombre de maisons individuelles en zone à risque, puis de l'augmentation de l'ampleur et de la fréquence des sécheresses.

Figure 9 : Fonction de dommages sectorielle – Retrait-gonflement des argiles

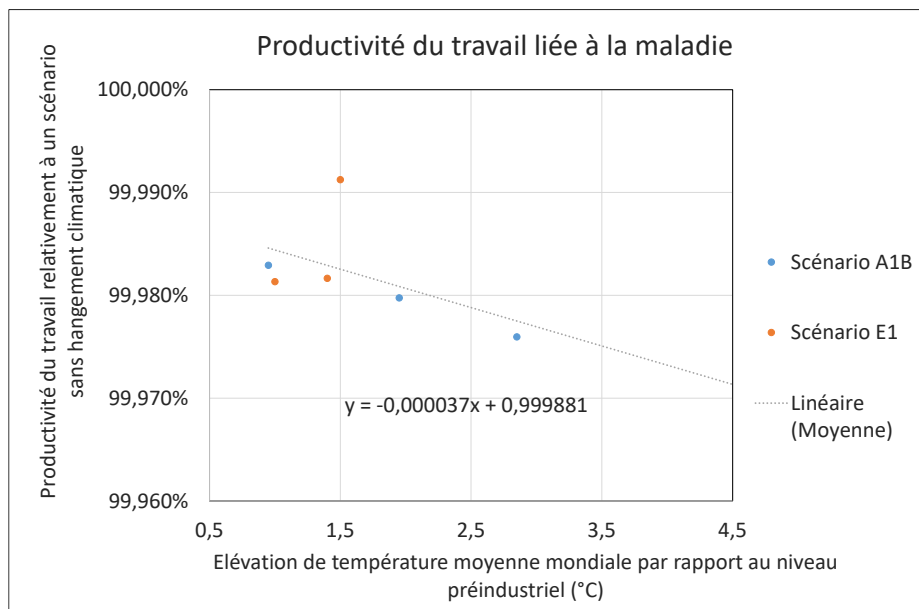


Source : calculs ADEME, d'après Gourdier et Plat (2018).

Productivité du travail et hausse des maladies

Paci (2014) évalue l'impact de l'élévation de la température sur la productivité au travail en Europe (en nombre de jours de travail perdus par habitant). On fait l'hypothèse que la valeur estimée par habitant pour l'Europe est applicable à la France.

Figure 10: Fonction de dommages sectorielle – Maladie



Source : calculs ADEME, d'après Paci (2014).

2.2.2. Impact des risques aigus en France

2.2.2.1. Impacts directs des catastrophes naturelles en France

La base de données internationales sur les situations d'urgences (EM-DAT pour *Emergency Events Database*) est une base de données mondiales recensant plus de 22 000 catastrophes naturelles et technologiques du début du XX^{ème} siècle à aujourd'hui. Elle recense des informations sur la catégorie d'événements, leur localisation géographique précise, leur durée, leurs coûts économiques (coûts des dommages, coûts assuranciers et de reconstruction) et humains (nombre de personnes touchées, blessées ou décédées). Gérée par le Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes (CRED) en Belgique, elle est ouverte pour la recherche académique et fait partie des plus grosses bases de données sur les risques extrêmes au monde¹⁹. Néanmoins, elle affiche les informations de manière hétérogène et reste soumise à des *data gap* importants.

Les éléments suivants peuvent faire défaut : couverture temporelle (avec des périodes/années manquantes), couverture spatiale hétérogène selon les régions, indicateurs manquants, estimations économiques manquantes, en particulier pour les événements à faible impact ou très fréquents. À titre d'exemple, les coûts économiques des inondations, qui sont les événements les plus recensés, sont ceux qui sont les plus mal documentés, tandis que les coûts des tremblements de terre ou les ouragans seraient relativement bien renseignés (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2021).

Sur l'ensemble du territoire français (regroupant la France métropolitaine et les DOM), la couverture des événements s'élargit à partir des années 1980, mais la couverture du coût des dommages resterait encore très parcellaire et ne concernerait quasi-exclusivement que les inondations et les ouragans (cf. Figure 11). Ce sont donc ces deux catégories d'événements qui, au regard des données disponibles, pèsent le plus

¹⁹ Avec les bases *MunichRe's NatCatSERVICE*, and *SwissRe's Sigma*, dont les accès sont plus restreints.

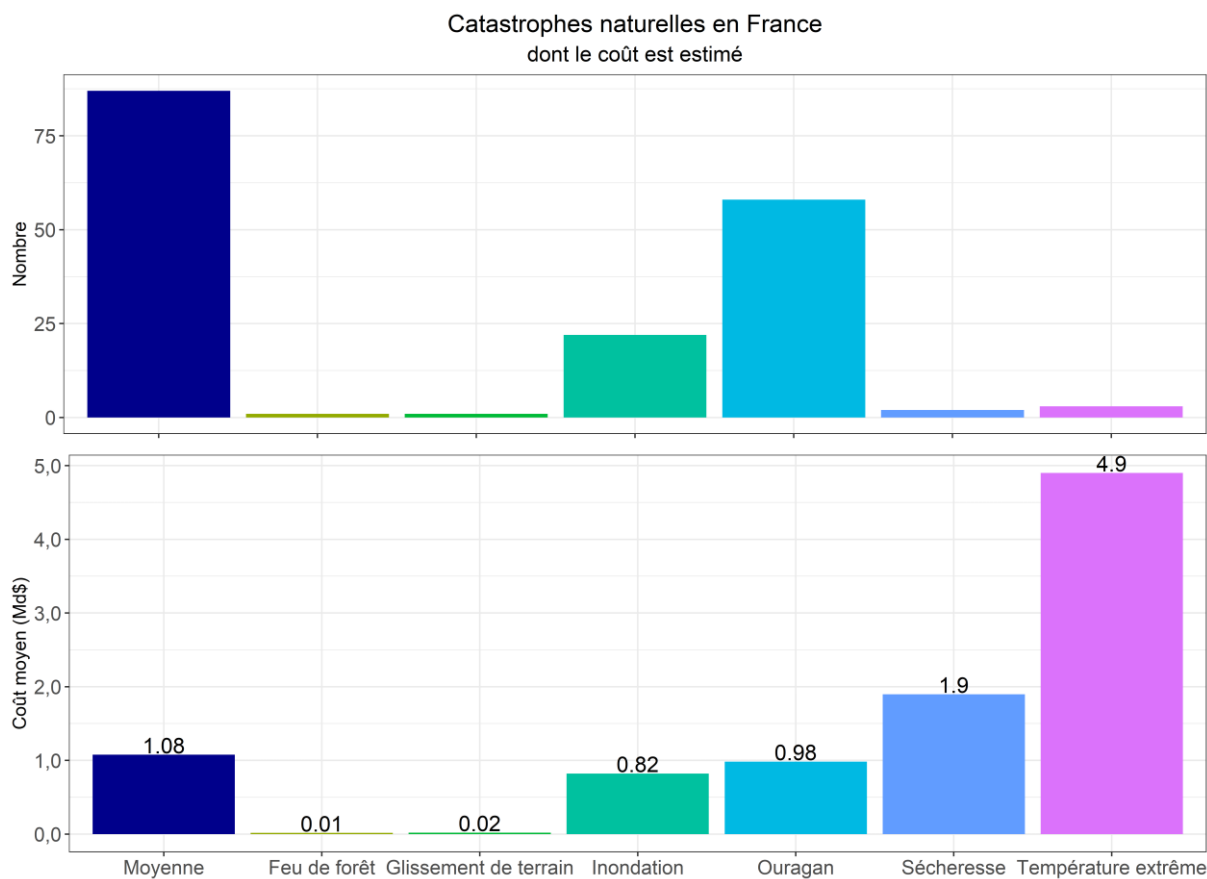
sur le coût global des événements extrêmes en France (en moyenne, 1 Md\$ par ouragans et 0,8 Md\$ par inondation). Malgré l'augmentation de leur intensité depuis 1990, le coût des épisodes de températures extrêmes reste encore peu détaillé (seuls trois événements sont recensés, dont la canicule de 2003 pour 6,5 Md\$ et la période de gel de 2021 dans la région du Rhône). Toutes catégories confondues, l'événement recensé le plus coûteux est l'épisode des cyclones extratropicaux Lothar et Martin de 1999, pour près de 20 Md\$ (cf. Annexe 4).

Figure 11 : Recensement des catastrophes naturelles en France et de leur coût économique



Source : calculs ADEME, à partir d'EM-DAT.

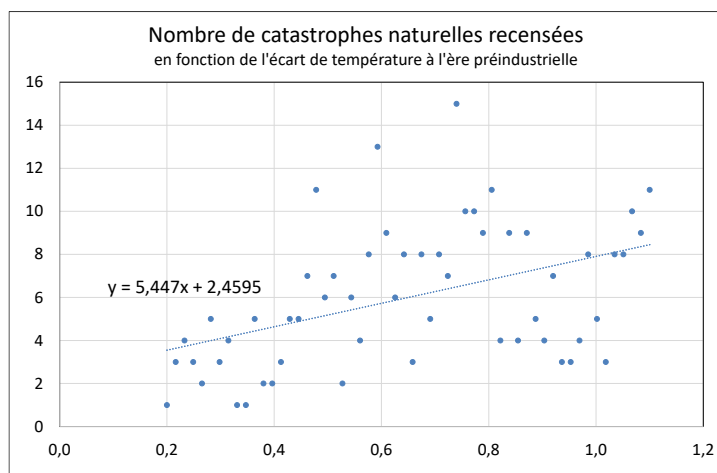
Figure 12 : Coût moyen des catastrophes naturelles en France par type d'évènement



Source : calculs ADEME, à partir d'EM-DAT.

Les données à disposition permettent d'évaluer une tendance à la hausse du nombre de catastrophes naturelles enregistrées et recensées dans la base. En imputant le coût moyen observé pour ces évènements (près de 1 Md€, cf. Figure 12), il est possible de construire un lien économétrique entre la hausse des températures depuis l'ère préindustrielle et la hausse de la fréquence des risques physiques extrêmes. Inclure ou non les autres évènements que les inondations et les ouragans modifie peu l'estimation, le nombre de ces évènements (avec un coût recensé dans la base) étant très faible. Ce modèle reste très parcellaire, car il ne tient pas compte de la hausse potentielle de la sévérité des évènements dans le futur, et n'étudie pas la prédominance de nouvelles catégories d'évènements à venir ainsi que des boucles de rétroaction et points de basculement. C'est pourquoi les effets à long terme des catastrophes naturelles dans un scénario d'inaction resteraient limités (autour de 1 point de PIB par an).

Figure 13 : Fonction de dommages sectorielle – Catastrophes naturelles en France



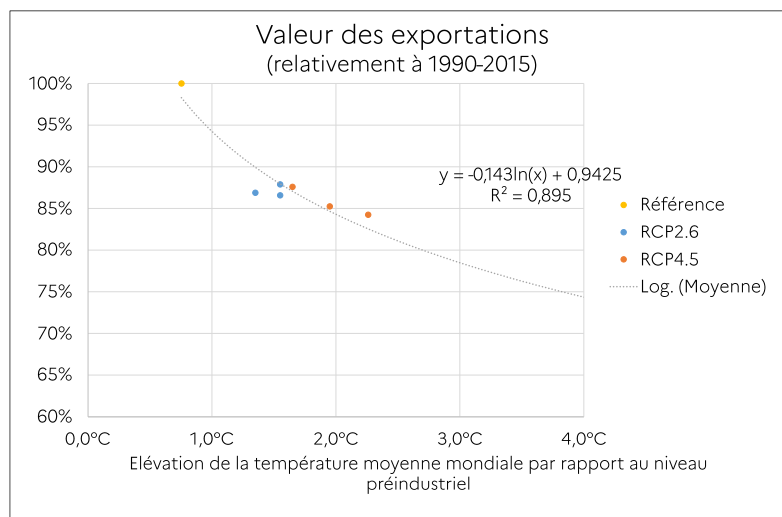
Source : calculs ADEME, à partir d'EM-DAT.

2.2.2.2. Impacts des événements extrêmes dans le monde sur le commerce français

L'approche mobilisée retient les effets directs du changement climatique en France, mais n'intègre pas les conséquences indirectes des dommages dans le reste du monde. Ceux-ci altéreront les économies étrangères et pèseront sur leur demande interne (donc sur la demande adressée à la France) et leurs prix (donc sur l'inflation importée en France et la compétitivité-prix). Enfin, les dommages pourront aussi influencer l'environnement financier (prix des matières premières, taux de change, taux d'intérêt). La non-prise en compte de ces effets a eu tendance à minimiser les coûts du changement climatique, par exemple lorsque l'évaluation était focalisée sur les seuls pays européens (Ciscar Martinez & al., 2014). Certaines études en économie ouverte ont toutefois pu spécifiquement évaluer l'impact du changement climatique sur la balance commerciale des pays européens. L'OCDE estime par exemple que le changement climatique associé à un scénario d'inaction aurait peu d'impact sur les exportations de l'Union européenne et des États-Unis à horizon 2060, mais pénaliserait davantage les exportations des pays asiatiques et africains (Dellink, Hwang, Lanzi, & Chateau, 2017). Au contraire, d'autres études évaluent des effets potentiellement massifs sur le commerce de l'Union. C'est cette hypothèse qui est privilégiée dans cette étude.

Les effets commerciaux sont ici estimés à partir d'une étude économétrique mesurant l'impact des catastrophes naturelles sur le niveau des exportations françaises (Schleypen, et al., 2019). Selon cette étude, les pays les plus touchés par les catastrophes naturelles seraient ceux dont la production est la plus dépendante des interconnexions mondiales. La hausse de la fréquence et de la sévérité des catastrophes naturelles pourrait donc perturber les chaînes logistiques et affaiblir le commerce des pays européens. Il y est souligné que la baisse des exportations observées serait due à deux mécanismes : la hausse des prix des intrants des entreprises françaises – ou la rupture de leur approvisionnement – et la diminution de la demande adressée aux entreprises lorsque leurs clients étrangers sont touchés par des catastrophes naturelles.

Figure 14 : Fonction de dommages sectorielle – Catastrophes naturelles dans le monde



Source : calculs ADEME, à partir de Schleypen et al. (2019).

2.3. Modélisation du coût des dommages

- Les rendements de la production agricole et d'électricité

La diminution des rendements écosystémiques (rendements agricoles et sylvicoles et rendements électriques) est modélisée comme une baisse de la productivité de l'ensemble des facteurs de production $PROG_{f,s,t}$ (travail, capital, biens intermédiaires, énergie) des secteurs considérés, de telle manière à diminuer dans la même proportion la production totale du secteur. Les baisses de productivité du travail,

liée d'une part à la dégradation des conditions de travail en extérieur et en intérieur, et à la hausse de l'absentéisme liée aux conditions de santé, sont modélisées comme des chocs sur la productivité tendancielle du travail en niveau $PROG_{L,s,t}$ (mais pas sur les autres facteurs de production).

Pour le facteur travail L dans les secteurs s :

$$PROG_{L,s,t} = PROG_{CC_{L,s,t}} \times PROG_{CC_{agri_{L,s,t}}} \times PROG_{CC_{elec_{L,s,t}}} \times PROG_{CC_{air_{L,s,t}}} \times PROG_{CC_{maladie_{L,s,t}}}$$

$$\text{Avec : } PROG_{CC_{agri_{f,s,t}}} = \begin{cases} \text{fonction estimée} & \text{si } s = \text{agriculture} \\ 1 & \text{si } s \neq \text{agriculture} \end{cases}$$

$$\text{Avec : } PROG_{CC_{elec_{f,s,t}}} = \begin{cases} \text{fonction estimée} & \text{si } s = \text{électricité} \\ 1 & \text{si } s \neq \text{électricité} \end{cases}$$

$$\text{Pour les autres facteurs : } PROG_{f,s,t} = PROG_{CC_{f,s,t}} \times PROG_{CC_{agri_{f,s,t}}} \times PROG_{CC_{elec_{f,s,t}}}$$

$$\text{Pour l'ensemble des facteurs } f : PROG_{CC_{f,s,t}} = PROG_{CC_{f,s,t-1}} \times (1 + GR_{PROG_{f,s,t}})$$

- Les dommages aux actifs physiques

Les dommages liés à la montée du niveau de la mer, au retrait-gonflement des argiles et aux catastrophes naturelles sont modélisés comme une hausse additionnelle du taux de dépréciation du capital sectoriel $K_{s,t}$, réparti entre les actifs immobiliers résidentiels $\delta'_{BUIL\ k,t}$ (pour 69 %, soit la part du capital résidentiel français estimé par Eurostat) et tertiaires $\delta'_{s,t}$ (pour 31 %). Enfin, l'effet est déduit du revenu permanent des ménages pour tenir compte des pertes de patrimoine et des effets ricardiens à long terme et va peser sur la consommation courante C_t .

$$K_{s,t} = (1 - \delta'_{s,t}) K_{s,t-1} + I_{s,t}$$

$$\delta'_{s,t} = \delta_{t,s} + 0.31 \times (\delta_{t,mer} + \delta_{t,RGA} + \delta_{t,extreme})$$

$$\delta'_{BUIL\ k,t} = \delta_{BUIL\ k,t} + 0.69 \times (\delta_{t,mer} + \delta_{t,RGA} + \delta_{t,extreme})$$

$$C_t = c \times Revenu_t - 0.69 \times (\delta_{t,mer} + \delta_{t,RGA} + \delta_{t,extreme}) \times BUIL_t \times P_{BUIL}$$

- La demande énergétique

L'évolution de la demande énergétique est modélisée comme une variation du besoin d'énergie par m² $ENER_{perM^2}$ et donc sur la demande incompressible d'énergie dans le secteur du logement.

$$ENER_{perM^2} = ENER_{perM^2} \times ENER_{perM^2_CC}$$

On introduit un choc dans la fonction de la demande notionnelle en énergie dans le secteur des services $F_{E,spri}$.

$$d(\log(F'_{E,spri})) = d(\log(Y_{spri})) - d(\log(PROG_{E,spri})) + d(SUBST_{E,spri})$$

$$F'_{E,spri} = F_{E,spri} \times ENER_{services_CC}$$

- Le commerce mondial

L'effet des catastrophes naturelles dans le reste du monde et les évolutions des flux touristiques sont modélisés comme des facteurs correctifs de la demande mondiale adressée à la France WD'_t .

$$WD'_{c,t} = WD_{c,t} \times WD_{supplychain_t} \times WD_{tourisme_{c,t}}$$

Avec : $WD_{tourisme_{c,t}} = \begin{cases} \text{fonction estimée} & \text{si } c = \text{services privés} \\ 1 & \text{si } c \neq \text{services privés} \end{cases}$

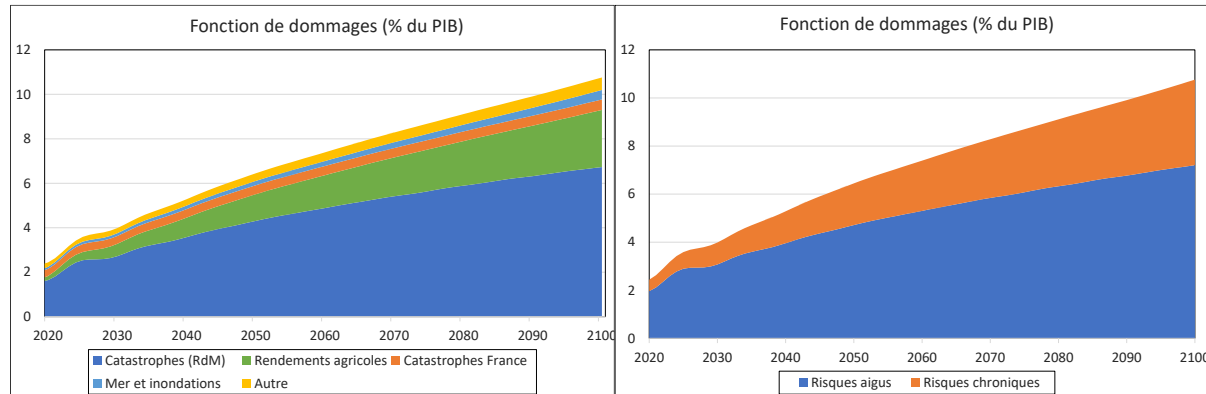
2.4. Évaluation du coût des dommages macroéconomiques et comparaison avec le NGFS

En introduisant ces fonctions de dommage, calibrées pour le scénario représentatif « Hot house world » (compatible avec le RCP 8.5, soit un réchauffement de près de 3,5°C d'ici la fin du siècle, par rapport à l'ère préindustrielle), il est possible d'estimer une fonction de dommage macroéconomique. Si la température devait atteindre ce niveau de réchauffement, les dommages du changement climatiques pourraient coûter plus de 10 points d'activité annuelle par rapport à un scénario sans changement climatique (cf. Figure 15). La contribution des dommages serait la suivante :

- les catastrophes naturelles se produisant dans le reste du monde (près de 6 points d'activité) ;
- la baisse des rendements agricoles (3 points d'activité) ;
- les coûts directs des catastrophes naturelles en France (1/2 point) ;
- la montée du niveau de la mer (1/2 point) ;
- enfin, l'ensemble des autres dommages confondus (1/2 point).

Si cette prépondérance des effets commerciaux est directement liée à l'estimation retenue hors modèle et reste donc soumise à de fortes incertitudes, elle est toutefois cohérente avec les différentes estimations de la littérature : la plupart des pays soumis à un climat tempéré pourraient être significativement touchés via le canal du commerce et les risques de propagation (Lancesseur, Labrousse, Valdenaire, & Nakaa, 2020).

Figure 15 : Fonction de dommages ADEME



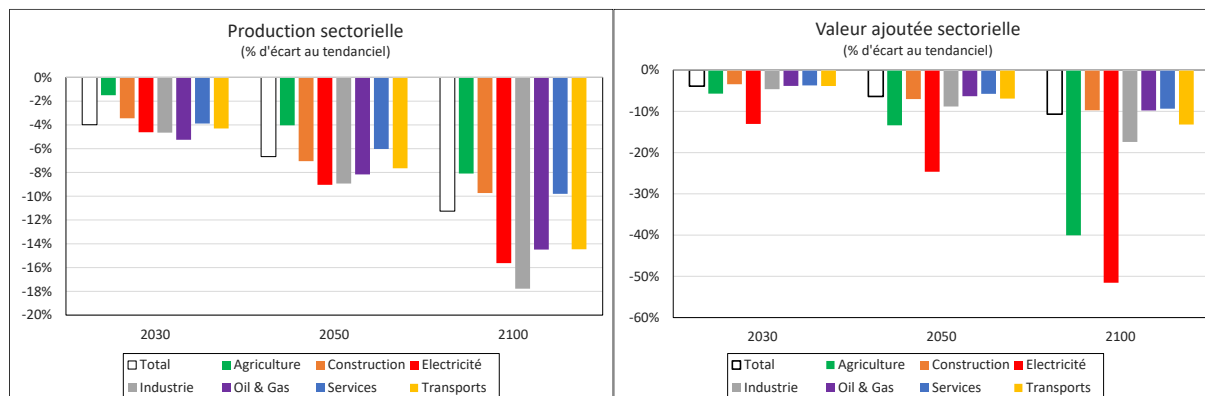
Source : simulation Three-ME associée aux hypothèses de réchauffement du scénario d'inaction « Hot house world » (NGFS, Phase I) conduisant à un réchauffement de +3,5 °C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle. Les autres risques regroupent le retrait-gonflement des argiles, l'évolution des rendements énergétiques, l'évolution de la demande énergétique domestique, les variations saisonnières du tourisme, la hausse de l'absentéisme au travail liée au coût des maladies.

Lecture : Le réchauffement climatique aurait déjà coûté près deux points de PIB en 2020 et coûterait près de 10 points de PIB en 2100 dans un scénario d'inaction, par rapport à un scénario sans changement climatique.

Dans le détail, l'activité de l'ensemble des secteurs économiques serait significativement touchée, bien que les risques et les effets soient très hétérogènes et aient des causes variées. Par construction, les principaux secteurs touchés sont avant tout les secteurs exportateurs (industrie et services). Exportateurs plus marginaux, les secteurs agricoles, ainsi que la production et distribution d'électricité, voient en l'absence de politique d'adaptation, leur production baisser aux mêmes rythmes que les rendements techniques. Toutefois, ils ne peuvent pas intégrer l'ensemble de la hausse des coûts de production liée à l'inflation et subissent des baisses de valeur ajoutée importantes. De son côté, la construction est aussi

marquée par le recul économique mais bénéficie de la demande en réparations et reconstructions liées aux dommages des risques chroniques et catastrophes naturelles sur les infrastructures²⁰. Le secteur de la distribution d'énergies fossiles est pénalisé par la baisse globale de la demande agrégée, mais également par les flux de reconstructions et aménagements qui remplacent les vieux logements et bâtiments détruits et réhabilités dans des classes moins énergivores, ce qui fait comptablement baisser l'intensité énergétique des ménages.

Figure 16 : Impacts sectoriels des dommages du changement climatique dans un scénario d'inaction



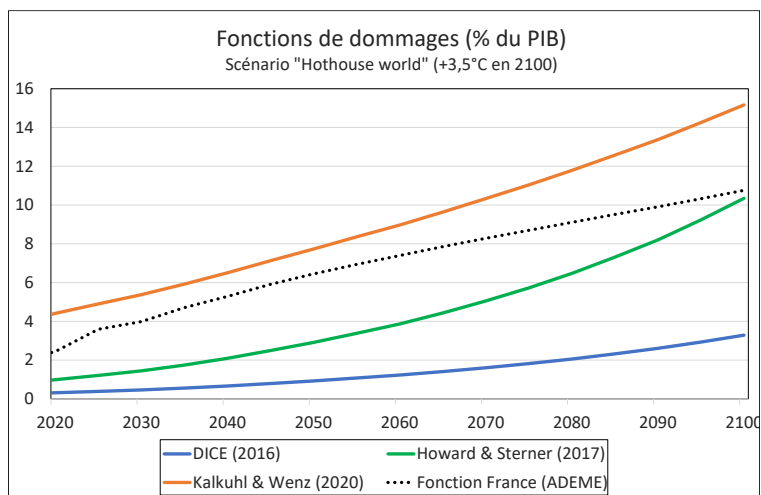
Source : simulation Three-ME associée aux hypothèses de réchauffement du scénario d'inaction « Hot house world » (NGFS, Phase I) conduisant à un réchauffement de +3,5 °C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle

Cette fonction de dommages reste une première estimation, basée sur des méthodologies ayant chacune leurs propres limites et incertitudes inhérentes. Elle s'appuie surtout sur une littérature académique et institutionnelle non exhaustive et en constante évolution. Elle n'est clairement pas valable pour des hausses de température très élevées. En particulier, elle n'inclut pas de manière exhaustive l'impact en France de l'ensemble des dommages du reste du monde (par exemple : l'effet de la baisse généralisée des rendements agricoles dans le monde). Elle vise à être progressivement approfondie, étendue et précisée au fur et à mesure des connaissances sur les impacts du changement climatique, dont la plupart restent encore soumis à une incertitude radicale.

L'estimation des dommages climatiques en France a fait l'objet de multiples approches avec des résultats très divergents, voire avec des gains pour certaines études. La Direction générale du Trésor recense par exemple, pour un scénario d'inaction, des dommages compris entre -2 et +5 % de PIB en 2050 et entre -6 % et +10 % en 2100 (Lancesseur, Labrousse, Valdenaire, & Nakaa, 2020) tandis que les travaux de modélisation macroéconomiques affichent des résultats très modestes (voir section 1.2). L'estimation de l'ADEME se place pour l'instant dans la fourchette haute de la littérature. Elle est également comparée aux dernières fonctions de dommage faisant référence dans la littérature au niveau mondial et appliquées dans les premiers scénarios du NGFS (NGFS, 2021). Les impacts estimés figurent parmi les plus élevés retenus par les superviseurs (cf. Figure 17).

Figure 17 : Comparaison des fonctions de dommage

²⁰ Les dépenses de logement sont considérées, au même titre que l'alimentation et l'énergie, comme des consommations contraintes.



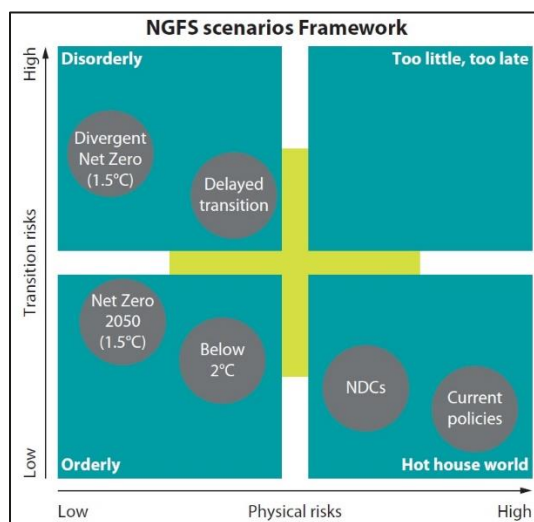
Source : base du NGFS, Phase I (2020).

3. Applications à des scénarios macroéconomiques de transition

3.1. Cadre méthodologique, hypothèses socioéconomiques, politiques et climatiques

Les risques de transition sont définis, selon le cadre analytique du NGFS, comme les éléments perturbateurs qui peuvent se matérialiser sur une trajectoire ordonnée permettant d'atteindre les objectifs de l'accord de Paris (maintien d'un réchauffement inférieur à 2°C d'ici la fin du siècle, voire de 1,5°C, par rapport à l'ère préindustrielle). Le NGFS (2021) propose un panel de six narratifs qui se distinguent selon le degré de planification de la transition (ordonnée ou désordonnée) et l'atteinte ou non des objectifs climatiques de l'accord de Paris (cf. Figure 18).

Figure 18 : Cadre analytique du NGFS



Source : NGFS (2021).

Plusieurs scénarios politiques sont envisagés et leurs conséquences évaluées à travers une suite de modèles économiques. Ils se distinguent selon l'ambition politique globale (mesurée notamment à travers l'implémentation d'un prix global du carbone, représentant l'ensemble des politiques publiques de transition), le niveau de préparation et d'anticipation de cette politique, le développement technologique, la maturité des techniques de capture et séquestration du carbone et la fragmentation régionale des politiques (cf. Figure 19).

Figure 19: Scénarios et narratifs du NGFS

Category	Scenario	Physical risk		Transition risk			Colour coding indicates whether the characteristic makes the scenario more or less severe from a macro-financial risk perspective ^A
		Policy ambition	Policy reaction	Technology change	Carbon dioxide removal	Regional policy variation ⁺	
Orderly	Net Zero 2050	1.5°C	Immediate and smooth	Fast change	Medium use	Medium variation	<ul style="list-style-type: none"> ■ Lower risk ■ Moderate risk ■ Higher risk
	Below 2°C	1.7°C	Immediate and smooth	Moderate change	Medium use	Low variation	
Disorderly	Divergent Net Zero	1.5°C	Immediate but divergent	Fast change	Low use	Medium variation	
	Delayed transition	1.8°C	Delayed	Slow/Fast change	Low use	High variation	
Hot House World	Nationally Determined Contributions (NDCs)	~2.5°C	NDCs	Slow change	Low use	Low variation	
	Current Policies	3°C+	None – current policies	Slow change	Low use	Low variation	

Source : NGFS (2021).

Lecture : Le scénario « Net Zero 2050 » affiche une cible de température de 1,5°C (risque physique faible), une action politique immédiate et progressive, une coordination régionale modérée et un recours modéré à la capture et séquestration du carbone (risque de transition modéré). Par la suite, ce scénario ordonné sera utilisé comme contrefactuel des scénarios à risques.

Les hypothèses retenues par l'ADEME s'inspirent en grande partie des narratifs du NGFS, mais s'en écartent parfois, par exemple en introduisant des scénarios spécifiques français (notamment en termes de mix énergétique), en étendant la modélisation à certaines variables sectorielles (cf.

Figure 20), en introduisant des chocs exogènes réalistes, dont la plupart sont ignorés par les outils macroéconomiques traditionnels (actifs échoués et dommages physiques notamment). En particulier, l'originalité de l'exercice est d'intégrer de manière ciblée le coût des dommages recensé par la littérature (voir partie 2). La capture et séquestration du carbone n'étant pas modélisée dans Three-ME, elle est supposée exogène et diminue le niveau d'émissions ex post, en particulier dans l'industrie lourde dont les émissions sont difficilement abattables par le seul prix du carbone.

Sentier de croissance partagé

Il est fait l'hypothèse des gains de productivité constants le long de la période, de 1,0 % par an en France et dans le reste du monde. À long terme, l'économie nationale croît au rythme fixé par le sentier de croissance de Solow, défini par la somme des gains de productivité et de l'évolution de la population active. De même, la demande mondiale croît à un rythme similaire, légèrement plus rapide du fait des projections démographiques plus dynamiques dans le reste du monde.

Hypothèses de transition

Contrairement aux scénarios de l'ADEME, qui mettent en lumière un panel de narratifs sectoriels et granulaires pour assurer une transition ordonnée à horizon 2050, l'exercice retient des hypothèses macroéconomiques centrales pour servir de contrefactuel. Le prix du carbone, principal levier public de

transition, représente ici un ensemble de signaux-prix réels envoyé aux agents et proportionnel à leurs intensités d'émissions carbone respectives. Ceux-ci peuvent représenter un ensemble de politiques publiques, aussi bien coercitives (par exemple, une taxe carbone, dont les recettes seraient intégralement redistribuées aux agents, des normes ou des réglementations) que plus générales (changements de comportements spontanés des agents, signaux informationnels). Les hypothèses s'appuient à la fois sur les hypothèses macroéconomiques du NGFS (prix du carbone) et les différents plans prospectifs français (mix énergétiques cohérents avec ceux projetés dans la Programmation Pluriannuelle de l'Energie et la Stratégie nationale bas-carbone). Les énergies renouvelables doivent se développer à un rythme relativement soutenu, tandis que les techniques de capture et séquestration du carbone (exogènes dans le scénario) sont supposées rester marginales et servir à compenser les émissions résiduelles de l'industrie²¹ (celles-ci étant faiblement abattues dans le scénario central). Enfin, l'action de transition ne s'accompagne pas d'une hausse de l'investissement public (l'investissement privé évolue lui sensiblement suite à l'introduction des signaux-prix).

Enfin, bien que le modèle représente le reste du monde comme exogène (à travers les prix des biens importés, la demande mondiale et les principales variables financières – change, taux d'intérêt, cours des matières premières), les scénarios de transition incluent les effets de rétroaction simulés par le modèle NiGEM de la Banque de France. En particulier, les scénarios de transition incluent un ralentissement du commerce mondial et une hausse de l'inflation importée. Pour différencier ces effets par biens et services, une maquette sectorielle ad-hoc représente l'hétérogénéité des chocs, notamment en tenant compte de l'intensité carbone comparative des biens et services issue de la table entrées-sorties EXIOBASE²².

Dans le détail, les hypothèses de transition :

- une action publique traduite par la hausse linéaire et anticipée des prix réels du carbone jusqu'à 900\$/tCO₂ en 2050, niveau proche de la valeur tutélaire du carbone française (France Stratégie, 2019);
- les prix de l'énergie projetés par l'AIE, anticipant une moindre hausse des prix fossiles réels en lien avec une modération continue de la demande; un mix énergétique cohérent avec les hypothèses du NGFS et les stratégies climatiques françaises, anticipant un fort développement de la production de biocarburants et de biogaz, une disparition du charbon dans la production d'électricité et une baisse limitée de la part du nucléaire au profit des moyens renouvelables (éolien, solaire);
- des hypothèses de commerce extérieur cohérentes avec une transition au niveau mondial, marquée par un phénomène global de relocalisation, une modération de la demande mondiale adressée à la France, une baisse de la demande énergétique fossile mais une évolution plus forte des prix à l'exportation du fait d'économies en moyenne plus carbonées que la France.

Le principal levier de transition est le signal-prix carbone, modélisé comme une taxe dont les recettes seraient intégralement et également redistribuées aux agents (50/50 ménages/entreprises²³). Contrairement à ses exercices prospectifs usuels, les signaux-prix fictifs ne sont pas calibrés de telle manière à représenter un plafond d'émissions qui découlerait par exemple d'une norme; il n'est pas non plus intégré de chocs exogènes d'efficacité énergétique par exemple, bien que de telles hypothèses puissent être raisonnablement mobilisées²⁴. La politique monétaire reste neutre par rapport à la hausse de l'inflation (cf. Annexe 1). Ces hypothèses sont déterminantes sur la nature des effets

²¹ L'ADEME estime le potentiel de développement de la CSC à près de 24 MtCO₂ réparties sur les principaux grands sites industriels. Dans la SNBC, la CSC a été identifiée à un niveau de 15 MtCO₂/an dont 5 MtCO₂ issu de l'industrie et 10 MtCO₂/an issu de la biomasse pour l'énergie (MTES, 2020).

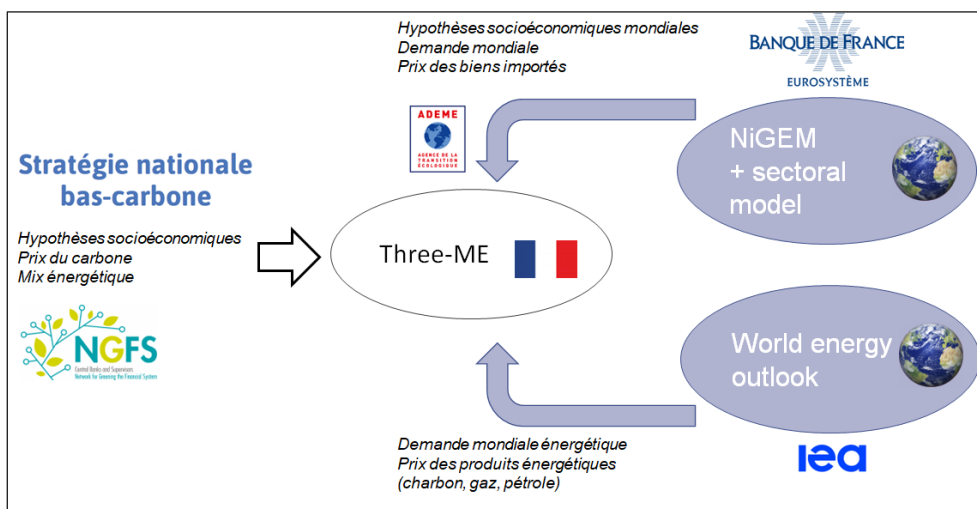
²² Une telle représentation statique reste sommaire. Par exemple, l'évolution des prix-relatifs suite à la mise en place d'un prix carbone est beaucoup plus complexe à modéliser : hausse des prix ex-post des prix des intrants carbonés, évolution des salaires, comportement de marges des exportateurs mondiaux...

²³ En théorie, une redistribution équitable serait plutôt autour de 60 % ménages/40 % entreprises. Également, la redistribution aux secteurs se faisant au prorata de leur production, elle pourrait légèrement favoriser les secteurs les plus émetteurs.

²⁴ Voir le rapport du WEO (2021), qui compare son approche à celle du NGFS : *"The scenarios include a number of other energy policies and accompanying measures designed to reduce emissions, and this means that the CO₂ prices shown are not the marginal costs of abatement as is often the case in other modelling approaches (NGFS, 2021)."*

macroéconomiques, bénéfiques ou non, de la transition et doivent être maniées avec précaution dans un tel exercice (Boitier, et al., 2023).

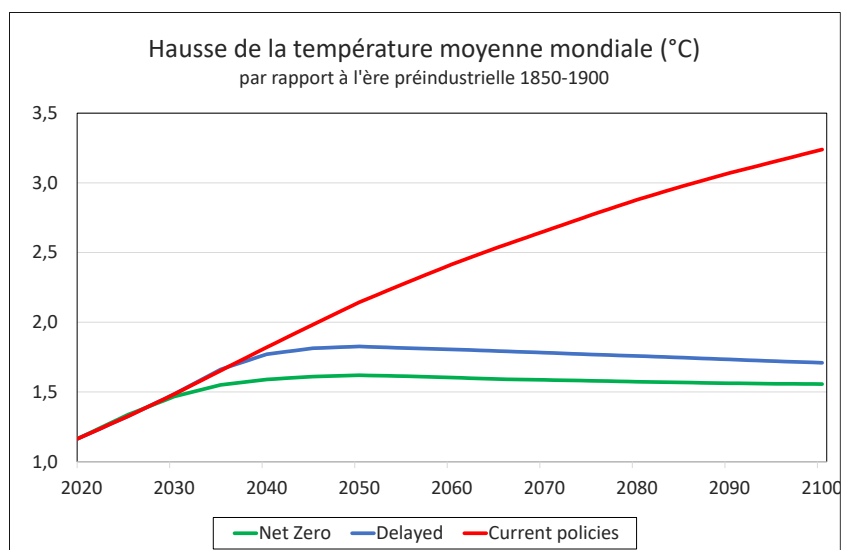
Figure 20 : Stratégie de modélisation des scénarios de transition



Hypothèses climatiques

Les scénarios de température sont issus des simulations du NGFS à partir des différents modèles d'évaluation intégrée (ici le modèle REMIND-MAGPIE). Ils sont appliqués de manière « exogène » au modèle. Les deux scénarios de transition (ordonnée et désordonnée) assurent le maintien d'une température inférieure à 2°C par rapport à son niveau de l'ère préindustrielle, tandis que le scénario d'inaction voit la température mondiale dépasser les 3°C d'ici la fin du siècle.

Figure 21 : Hausse de la température moyenne mondiale selon les scénarios du NGFS



Source : NGFS (2021).

3.2. Scénario de référence : le scénario Net Zero 2050 avec risques physiques

Il est proposé de retenir le narratif « Net Zero 2050 » comme scénario contrefactuel²⁵ pour l'évaluation de l'ensemble des risques, ainsi que la trajectoire de température sous-jacente issue des bases de données du NGFS. Ce scénario implique des risques de transition et physiques limités, ce qui le place parmi les scénarios dits « ordonnés ». La Figure 22 en décrit les impacts macroéconomiques et la figure 16 les impacts sectoriels, par rapport à une trajectoire tendancielle, fictive et non réaliste, supposant l'inaction climatique mais n'intégrant pas les risques physiques (ce qui se rapproche des projections tendancielle traditionnelles faites par les institutions). Ces impacts sont beaucoup plus faibles que ceux estimés lors de l'inaction (cf. section 3.4).

La modélisation de ce scénario permet de mesurer, non pas l'impact de la transition ordonnée, mais l'effet cumulé de la modélisation de la transition et du coût des dommages sur le sentier de croissance traditionnel. Ici la modélisation des risques physiques pèse sur le sentier de croissance du scénario NZ50 et ses effets négatifs (-2,2 pts de PIB en 2100) ne sont pas compensés par les bénéfiques économiques de la transition ordonnée (+1,7 pts de PIB en 2100).

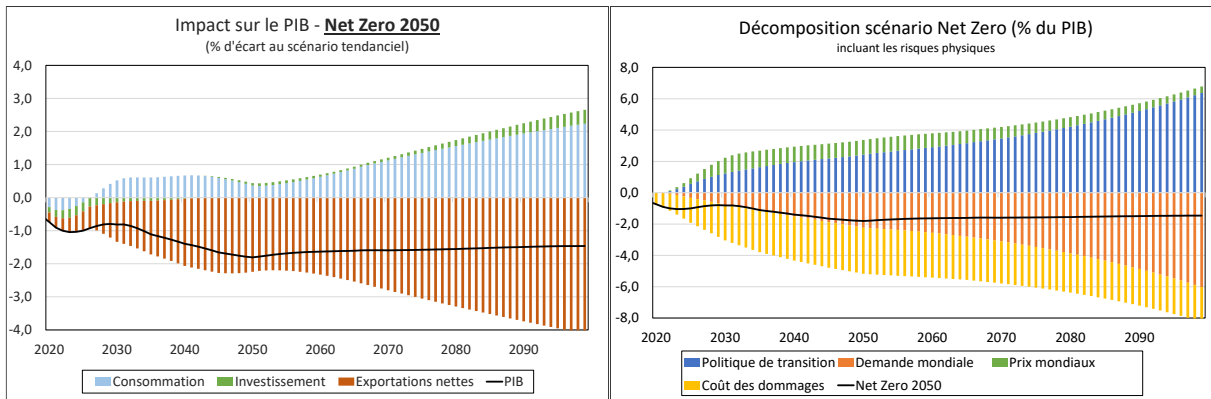
Sur le plan domestique, la redistribution des revenus de la taxe carbone modère largement les effets initiaux récessifs (hausse des coûts de production, perte de pouvoir d'achat des ménages). Soutenus par un accès non contraint au financement, les ménages rénovent massivement les logements mal isolés, achètent des véhicules plus performants et de nouveaux véhicules électriques, ce qui améliore leur pouvoir d'achat et diminue leurs dépenses contraintes. La hausse de la demande d'électricité et le développement des énergies renouvelables (qui conduisent à une relocalisation massive de la production d'énergie en France) et la baisse de la facture énergétique soutiennent les créations d'emplois et les investissements des secteurs émergents.

Sur le plan international, le ralentissement immédiat du commerce extérieur pèse marginalement sur l'activité en début de période et finit par être compensé par une légère amélioration de la compétitivité-prix à l'export et surtout une baisse des prix de l'énergie en lien avec la modération de la demande énergétique globale. Toutefois, les importations augmentent et continuent de creuser le déficit commercial. Au global, les effets de la transition dans le reste du monde tendent à s'équilibrer, et les gains économiques sont tirés par les politiques intérieures (cf. Figure 22).

Comme détaillé à la Figure 16, l'ensemble des secteurs est touché par les dommages du changement climatique. À quelques exceptions notables : le secteur du bâtiment bénéficie de la hausse de la demandes de reconstruction, mais aussi des demandes de rénovation et d'investissement d'efficacité énergétique liée à la forte hausse des prix des combustibles ; le secteur de l'électricité profite, jusqu'en 2050, de la hausse de la demande (essentiellement liée à l'expansion des véhicules électriques) et l'électrification des procédés pour augmenter sa production, mais sa valeur ajoutée diminue du fait de la transition du mix électrique vers des productions d'énergies plus intensives en consommations intermédiaires ; de même, malgré la baisse globale de la vente de carburant et de gaz, la valeur ajoutée du secteur se rétablit partiellement à long terme du fait de la percée des biocombustibles, moins coûteux en consommations intermédiaires (cf. Figure 23).

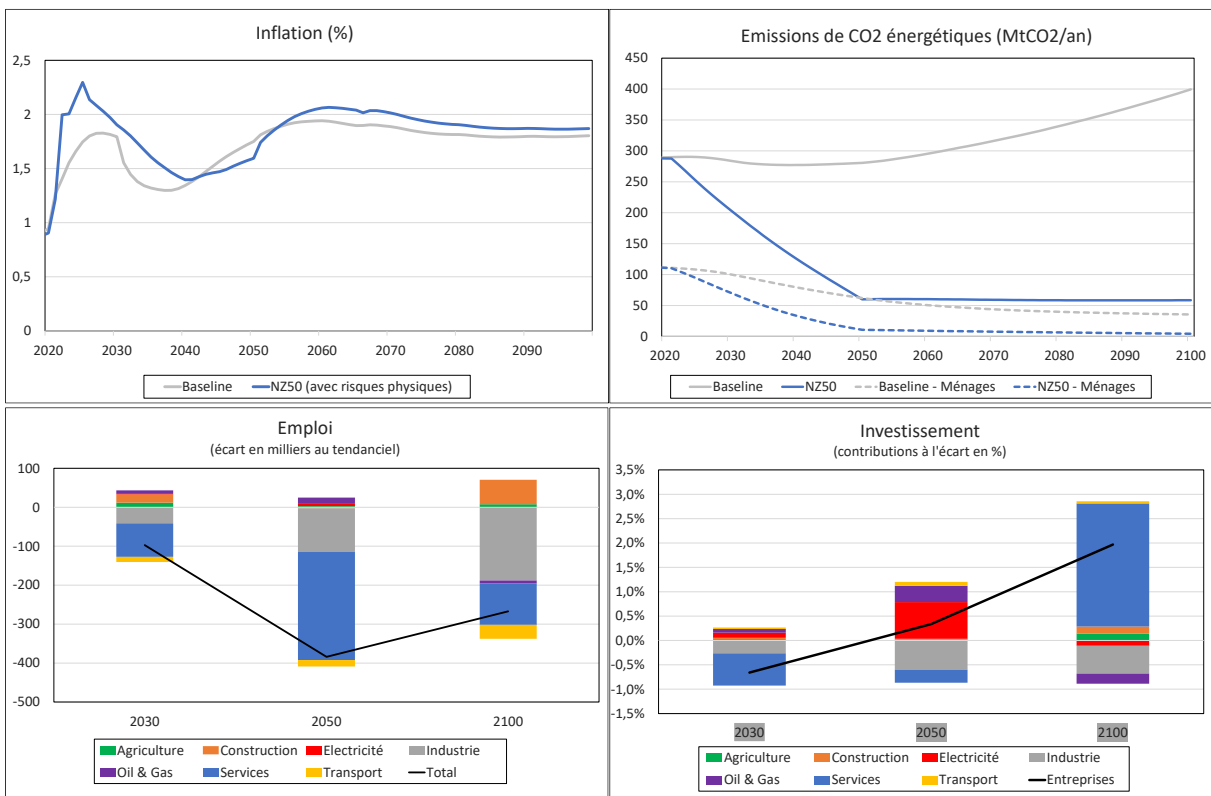
Figure 22 : Impact macroéconomique du scénario de transition « Net Zero 2050 » (avec risques physiques)

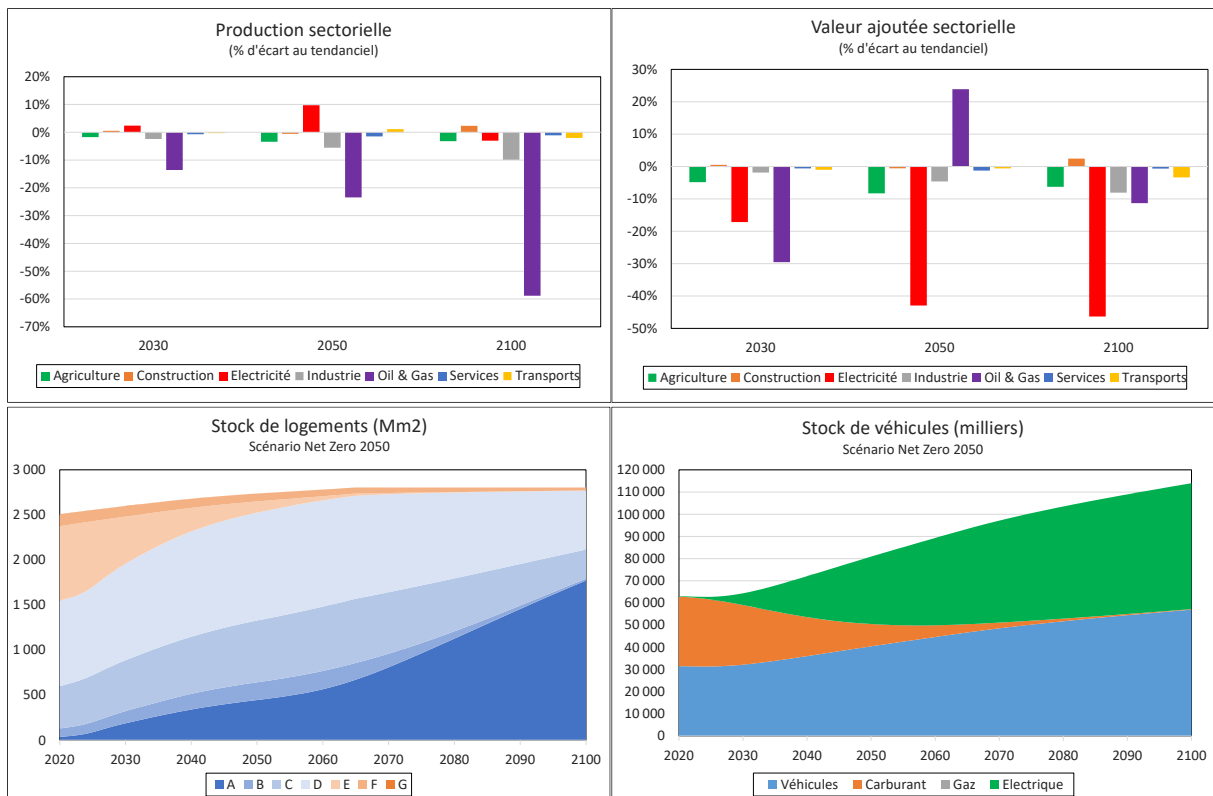
²⁵ Pour une description plus détaillée des impacts des risques de transition, d'aucuns pourront se référer aux travaux de l'ADEME associés (Boitier, et al., 2023).



Source : modèle Three-ME.

Figure 23 : Impacts sectoriels détaillés du scénario « Net Zero 2050 » (avec risques physiques)





Source : modèle Three-ME.

3.3. Stress-test climatique n°1: scénario de transition retardée («Delayed transition»)

Le scénario retardé dit «Delayed transition» suppose la poursuite des politiques existantes et le développement prolongé des énergies fossiles jusqu'en 2030. À partir de cette date, les pouvoirs publics imposent des politiques soudaines, non anticipées et brutales de prix du carbone pour rattraper les engagements de long terme, de telle manière à maintenir la hausse de température inférieure à 2°C d'ici la fin du siècle, soit des résultats finaux moins ambitieux que dans les scénarios ordonné et fragmenté, ce qui doit se traduire par des dommages climatiques additionnels.

La politique de transition, marquée par une hausse de la taxe carbone et une évolution du mix énergétique, est supposée avoir des effets similaires que dans le scénario ordonné. Toutefois, en complément des narratifs du NGFS, il est fait l'hypothèse que le choc macroéconomique s'accompagne de frictions sur l'ajustement des facteurs de production. À l'instar d'exercices similaires (Bank of England, 2021), ces frictions incluent :

- le mix énergétique : l'évolution de la production énergétique sera physiquement contrainte et ne peut pas être plus rapide que dans le scénario ordonné. Cela implique, d'une part que les émissions ne peuvent pas baisser à un rythme plus rapide, mais aussi que les bénéfices de la transition (marqués par des investissements et une relocalisation des emplois et de la production énergétique) seront moins marqués et en partie repoussés vers la 2^{ème} moitié du siècle ;
- le marché du capital : en lien avec la littérature académique (IRENA, 2017), il est fait l'hypothèse qu'une transition retardée s'accompagnera d'une dépréciation massive d'actifs physiques et financiers dans les différentes régions du monde, en particulier dans le secteur du bâtiment, les secteurs extractifs, la production d'énergie et l'industrie. En France, une transition retardée pourrait conduire à près de 1100 Md\$ d'actifs échoués cumulés sur la période, soit près de 50 Md\$ additionnels chaque année entre 2030 et 2050, essentiellement concentrés dans le résidentiel et le tertiaire (cf. Encadré 3).
- le marché du travail : le retard de mise en œuvre des politiques de transition s'accompagnera d'une transition également contrariée des formations des travailleurs. Le transfert vers des secteurs et des métiers en recomposition se fera au prix de pertes de productivité. Ces coûts ont également fait l'objet de chiffrages prospectifs dans la littérature : le NIESR estime par exemple qu'une transition repoussée post-2025 pourrait coûter, au niveau mondial, près de 120 000 Md\$ cumulés du fait de l'inadéquation temporaire entre offre et demande de travail (Mercurie, Chester, Lynch, Jarvis, & Jarvis, 2021).

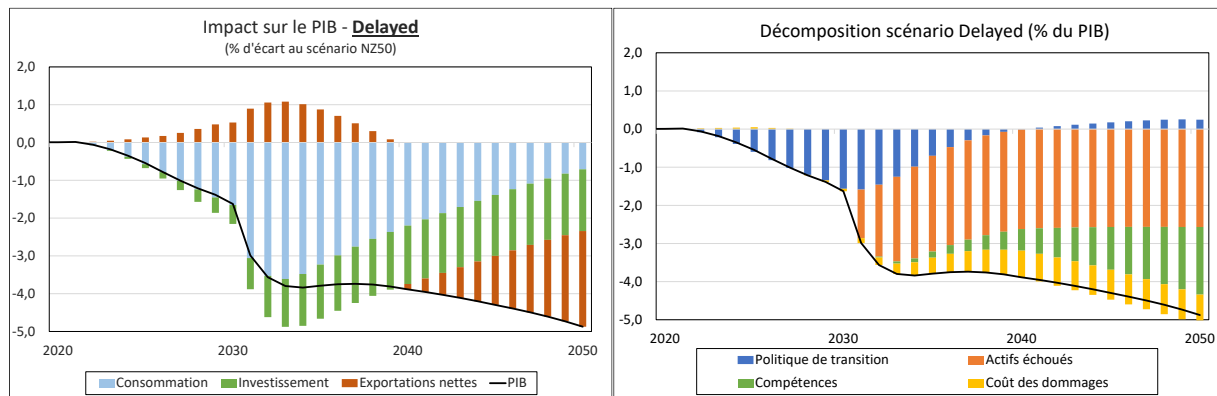
Le scénario retardé est supposé peser pour près de -1,5 point de PIB en 2030, -5 points de PIB en 2050 et aurait un effet quasi-neutre à l'horizon de la fin du siècle. À court terme, les légers gains liés à la transition sont donc partiellement évincés et repoussés à la deuxième moitié du siècle. À partir de 2030, les actifs échoués pèsent sur les primes de risques et le coût de refinancement des entreprises, ainsi que sur le pouvoir d'achat des ménages qui voient chuter la valeur de leurs biens immobiliers énergivores et doivent épargner davantage pour financer les travaux de rénovation. Enfin, les nouveaux besoins en compétences se traduisent par une baisse temporaire de la productivité du travail dans les secteurs émergents ainsi que dans l'ensemble de l'économie. Finalement, les risques de transition²⁶ pèseraient pour près de 4 points de PIB en 2050 (cf. Figure 24), soit un niveau similaire à ce qui avait été estimé dans le scénario retardé de l'exercice-pilote de la Banque de France (Allen, et al., 2020).

Du fait de l'inertie, les trajectoires de température restent, quel que soit le scénario d'action, similaires jusqu'en 2030. À partir de cette date, le scénario de transition dit «retardé» affiche une hausse de température supérieure aux autres scénarios de transition complet (près de 0,3°C additionnels en moyenne jusqu'à la fin du siècle). Ce scénario affichera donc des risques physiques supérieurs qu'il convient d'estimer à partir des nouvelles fonctions de dommages. Intégrés aux scénarios, ceux-ci

²⁶ D'autres risques pourraient également se matérialiser, par exemple à travers des contraintes sur la maturité des technologies de capture et séquestration du carbone. Ici, il est estimé que le surcoût lié à un retard dans la transition resterait marginal, le potentiel étant estimé à près de 24 MtCO₂ et les coûts macroéconomiques limités, entre 100 € et 150 € la tonne de CO₂ évitée (ADEME, 2020).

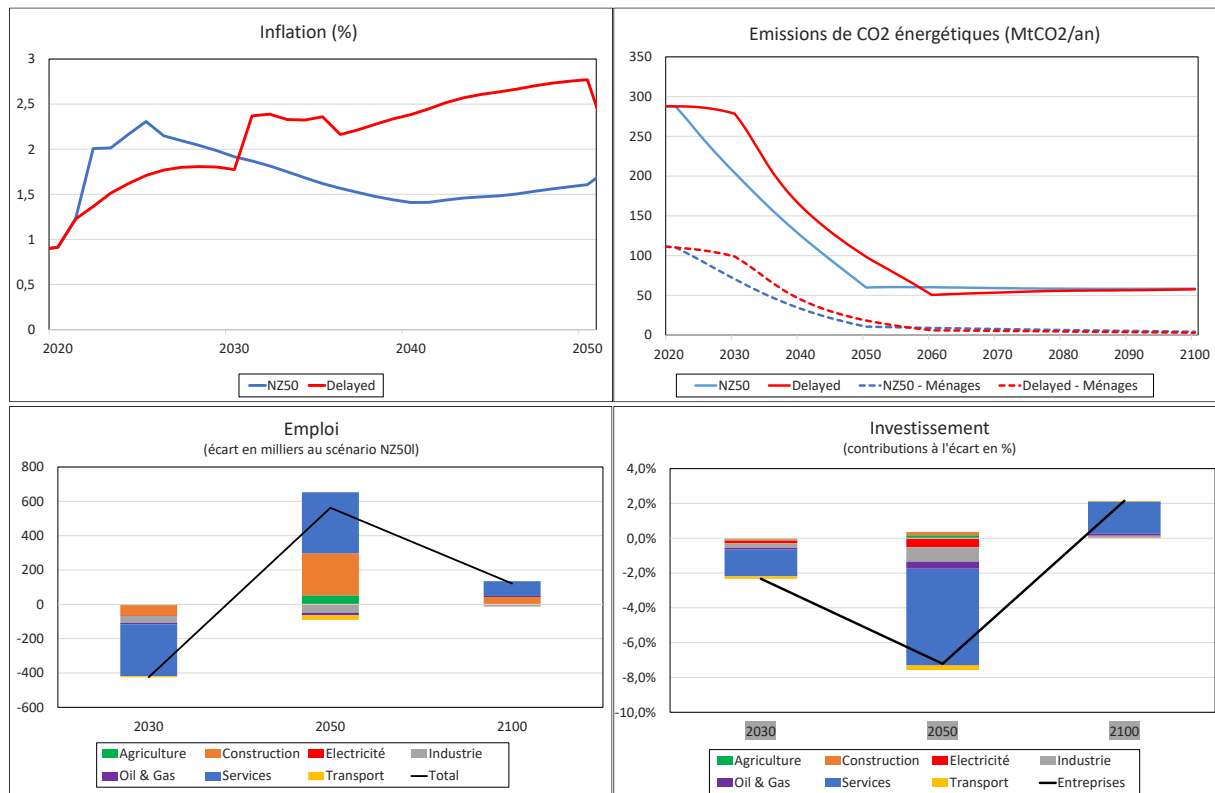
causeraient une perte de près de +1,0 point de PIB supplémentaire par rapport aux seuls risques de transition (cf. Figure 24).

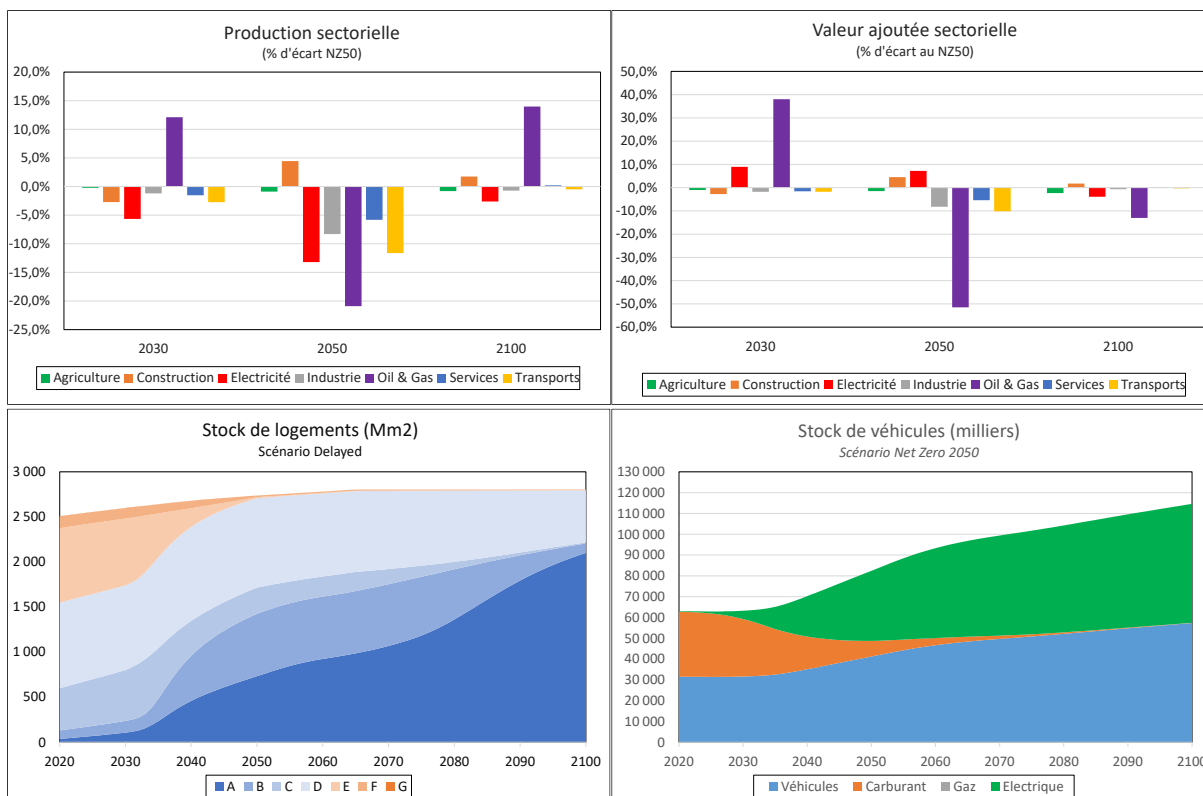
Figure 24 : Impact macroéconomique du scénario désordonné « Delayed transition »



Source : modèle Three-ME.

Figure 25 : Impacts sectoriels détaillés du scénario désordonné retardé





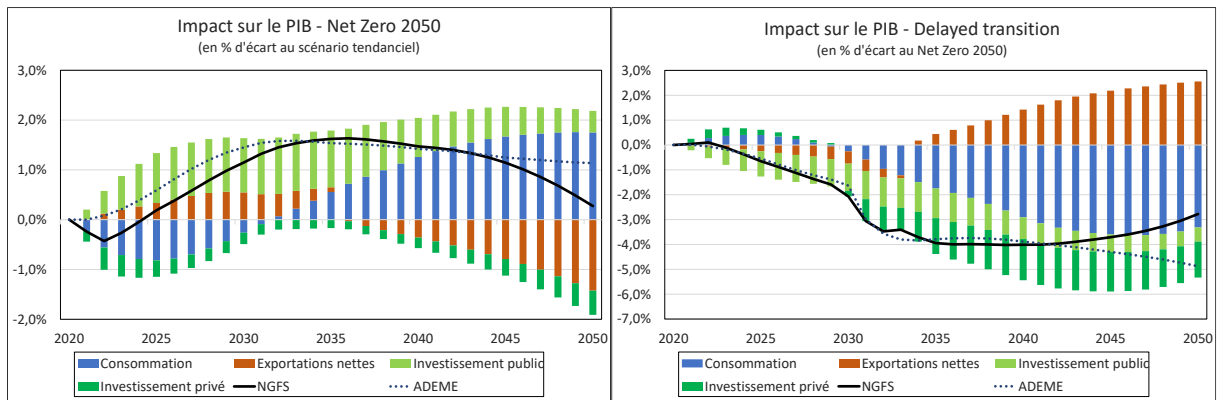
Source : modèle Three-ME.

Comparaison avec les scénarios de transition du NGFS

Les projections macroéconomiques du NGFS pour la France (2021) présentent des similitudes avec les simulations de l'ADEME. Toutefois, en plus de différences structurelles, les scénarios reposent sur des hypothèses de transition et d'accompagnement qu'il convient d'explicitier pour interpréter correctement les résultats (cf. Tableau 5).

Le scénario de transition ordonnée générerait un léger bénéfice à moyen et long terme, après un ralentissement au début de la période de transition (cf. Figure 26). L'ADEME souligne néanmoins une différence dans les sources de l'activité, marquée par un surcroît d'investissement et de consommation tiré par les économies d'énergie et la relocalisation, tandis que le NGFS anticipe une baisse de l'investissement privé mais une forte hausse de l'investissement public soutenue par les recettes de taxe carbone. Enfin, les scénarios retardés seraient aussi défavorables dans les deux modélisations et avec des contributions similaires de la demande (cf. Figure 26). Toutefois, ces évolutions sont essentiellement dues, côté ADEME, aux frictions spécifiquement incluses (coût du capital et productivité du travail) et au coût des dommages, là où elles seraient causées par l'effet récessif d'une taxe carbone plus élevée, une politique monétaire plus réactive à l'inflation (cf. Tableau 5) et un choc de confiance additionnel dans le scénario NGFS (NGFS, 2021).

Figure 26 : Comparaison des scénarios de transition avec les scénarios du NGFS



Source : base du NGFS (2021), calculs des auteurs.

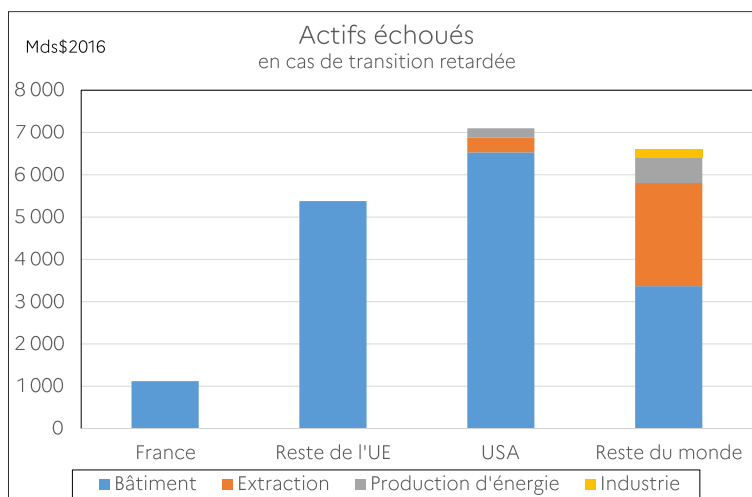
Note : Dans le graphique de gauche, les coûts des dommages sont exclus des scénarios ADEME.

Encadré 3 : Coûts échoués et modélisation macroéconomique

La notion d'actifs échoués est large et dépend notamment de la perspective des différentes institutions amenées à l'étudier. Ils peuvent concerner à la fois des actifs physiques (un bâtiment, un haut fourneau) et des actifs financiers (une obligation, la valorisation d'une compagnie pétrolière). L'Agence internationale de l'énergie les définit comme « les investissements déjà réalisés mais qui, avant le terme de leur durée de vie économique, ne sont plus en mesure de produire un retour économique du fait des évolutions économiques et réglementaires liées aux politiques climatiques » (IEA, 2015). La littérature reconnaît l'impact économique majeur de ces actifs, en particulier selon le degré de préparation et d'anticipation de la transition énergétique.

Une estimation de l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) recense le stock mondial des capitaux dépréciés dans cas d'une transition qui ne débiterait qu'en 2030. Ce retard entraînerait la perte anticipée d'une valeur de près de 20 000 milliards de dollars (cf. Figure 27). Plus de la moitié concernerait les économies occidentales et le seul secteur du bâtiment, du fait de la durée de vie très élevée de ces actifs et des faibles dynamiques de nouvelles constructions dans ces économies. Ces coûts pourraient constituer un risque important pour la stabilité financière (IRENA, 2017).

Figure 27 : Estimation du total des actifs échoués mondiaux dans un scénario retardé



Source : IRENA (2017), ventilation extrapolée à partir du scénario anticipé.

Sur le modèle des actifs physiques, d'autres travaux encore prospectifs ont cherché à évaluer les coûts humains liés à une transition retardée qui n'aurait pas anticipé les nouveaux besoins de formations et de compétences, soit des pertes en « capital humain ». Par exemple, le NIESR estime qu'une partie majeure de la population active sera concernée par un changement professionnel, la durée de vie professionnelle étant plus longue que le temps restant pour atteindre les objectifs des accords de Paris (Mercure, Chester, Lynch, Jarvis, & Jarvis, 2021).

Les modèles macroéconomiques dits « néo-keynésiens » n'intègrent pas ces dynamiques. En particulier, la plupart font l'hypothèse d'un ajustement immédiat de l'offre à la demande, et ce sur tous les marchés. Les frictions économiques liées à une transition désordonnée sont donc négligées si les macroéconomistes ne les incluent pas spécifiquement dans leurs scénarios. C'est pourquoi l'ADEME choisit d'intégrer les coûts des frictions de manière tendancielle et par les canaux suivants :

- une hausse du taux de dépréciation dans le secteur tertiaire, produisant une hausse des coûts du capital pour les entreprises, des coûts de production relevés et un recul de l'investissement ;
- une baisse du pouvoir d'achat des ménages, liée à la dévaluation des valeurs immobilières à la revente, mais aussi à des effets de richesse à court terme qui conduisent à des comportements d'épargne de précaution ; ces effets, transitant par le patrimoine financier des ménages, restent à préciser ;
- une baisse de la productivité du travail temporaire entre 2030 et 2050.

Tableau 5 : Comparaison des hypothèses de transition et d'accompagnement

Scénarios	Risque de transition		Politique fiscale et monétaire	
	NGFS	ADEME	NGFS	ADEME
Net Zero 2050	Prix du carbone Mix énergétique Efficacité énergétique		Redistribution vers l'investissement public Règle de Taylor	
Delayed	Prix du carbone Mix énergétique Efficacité énergétique	Prix du carbone Mix énergétique retardé Efficacité énergétique Coûts échoués	Redistribution vers les ménages Règle de Taylor Choc de confiance additionnel	Redistribution égalitaire (50/50) Taux d'intérêt réels constants

Source : NGFS (2021).

3.4. Stress-test climatique n°2 : scénario d'inaction (« Current policies »)

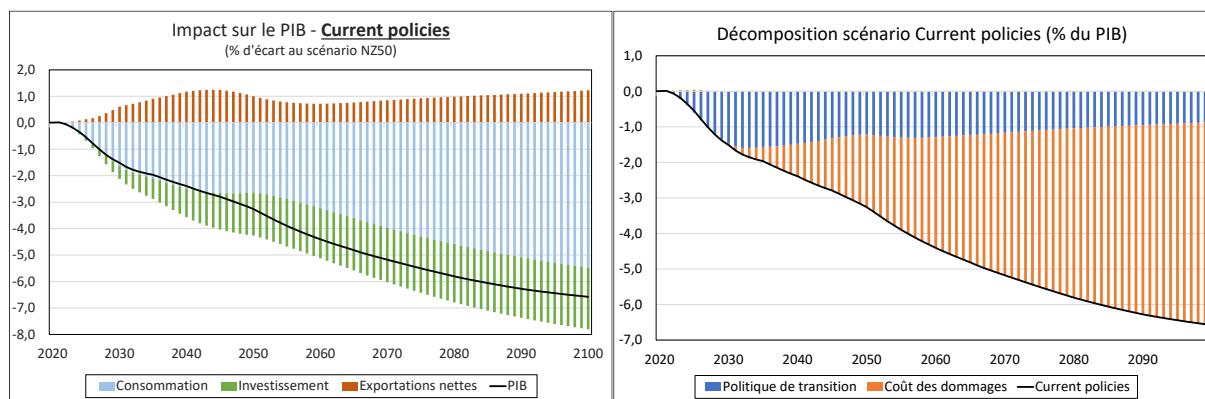
Le scénario d'inaction dit « Current policies » suppose l'absence de toute nouvelle politique de transition après 2022 et une conservation du mix énergétique tel qu'il est aujourd'hui. L'impact macroéconomique de l'inaction politique se traduit par l'absence des bénéfices observés dans le scénario ordonné (section 3.2). Mais les trajectoires de température divergent significativement à partir de 2030, et le coût des dommages additionnels observés alors monte progressivement en charge. À l'horizon de la fin du siècle, le scénario d'inaction coûterait près de 7 points de PIB annuels, dont 1 point lié au gel des politiques de transition et 6 points de PIB du fait des coûts des dommages additionnels (cf.

Figure 28).

Les dommages sectoriels suivent essentiellement les coûts modélisés dans la construction de la fonction de dommages (section 2) pour près de 6 points de PIB. Par construction, le secteur Oil & Gas est largement bénéficiaire et tous les autres secteurs reculent en production (cf. Figure 29). Les destructions d'emplois et la baisse de l'investissement sont principalement concentrées dans le secteur des services, bien que

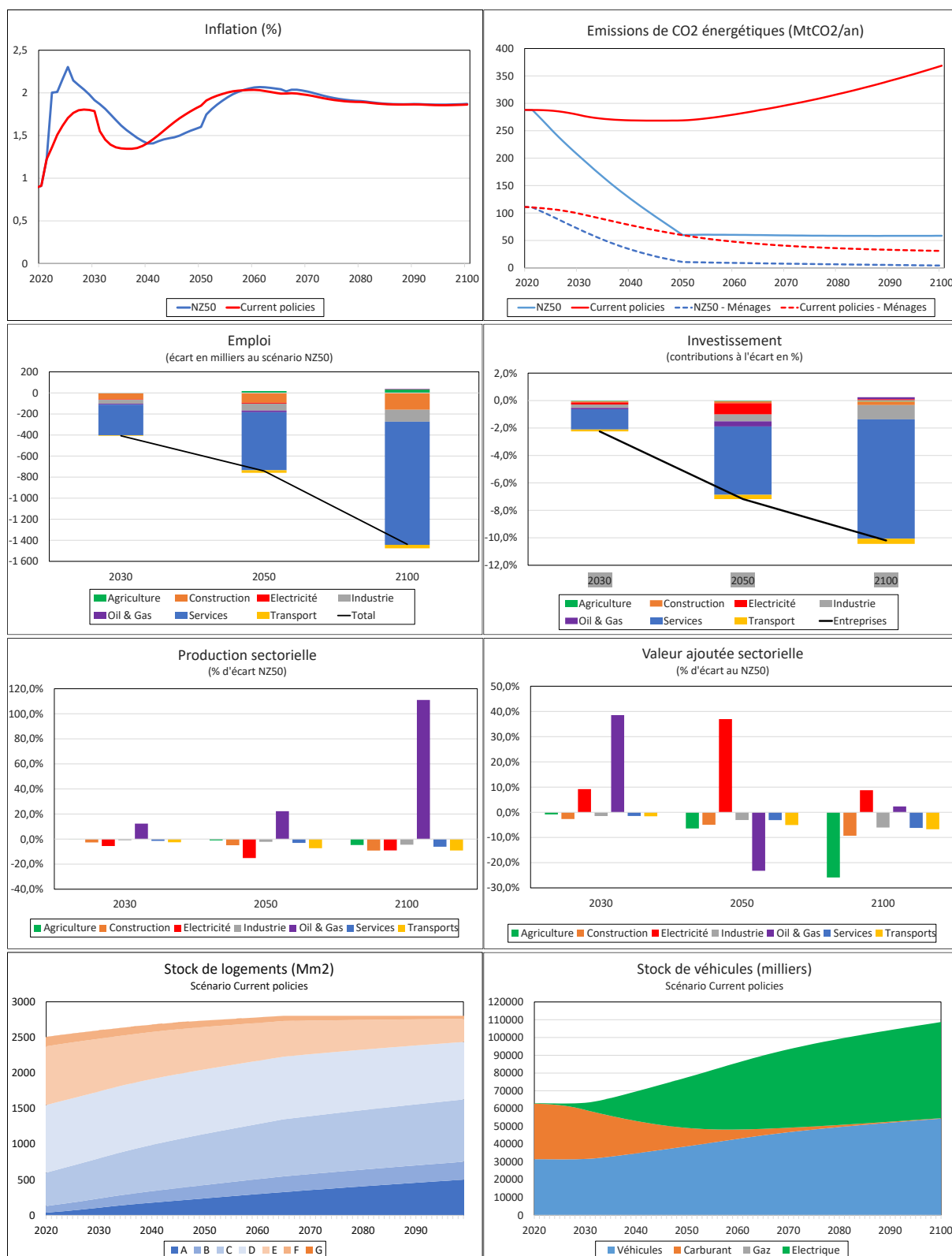
celui-ci ne soit pas le plus directement exposé aux risques physiques. À noter que le secteur de l'électricité voit sa valeur ajoutée augmenter (malgré une baisse de la production) car, en cas de maintien du mix électrique dans sa situation initiale, l'ensemble du secteur demande à production donnée moins de consommations intermédiaires que dans le scénario de transition.

Figure 28 : Impact macroéconomique du scénario d'inaction « Current policies »



Source : modèle Three-ME.

Figure 29: Impacts sectoriels détaillés du scénario d'inaction « Current policies »



Source : modèle Three-ME.

4. Conclusion, limites et perspectives

4.1. Mécanismes économiques et secteurs à risques

En appliquant la méthodologie « bottom-up », l'ADEME étend de manière exhaustive l'évaluation du coût des dommages en France bien qu'elle reste soumise aux principales limites recensées par la littérature : modélisation « tendancielle » des catastrophes naturelles peu pertinente, effets de propagation des risques physiques dans le reste du monde mal pris en compte, difficulté de modéliser des effets liés aux pertes de richesse des agents (dommages aux actifs). Les modèles de demande keynésiens restent également limités pour évaluer les limites physiques et les effets concrets d'une pénurie, qui se traduirait par des effets de rationnement des agents par exemple mais sortent du périmètre d'étude de nos modèles macroéconomiques (où l'équilibre est *in fine* assuré par les variations de quantité). Enfin, la projection s'appuie toujours sur une hypothèse de croissance exogène et celle-ci est peu réaliste dans des scénarios climatiques aussi contrastés qui voient un bouleversement des moyens de production.

Toutefois, c'est la première fois, à notre connaissance, qu'un modèle macroéconomique essaie d'intégrer des contraintes sur la production nationale (la demande devant alors être assurée par des importations plus onéreuses), de distinguer les méthodes de fixation des prix selon les secteurs (par les coûts de production ou par les équilibres de marché) et la nature des biens consommés selon les préférences des ménages (biens de première nécessité ou non). Historiquement, les modèles multisectoriels gardent en général une même structure sectorielle, dans laquelle les agents adoptent des comportements symétriques.

Hormis les secteurs exportateurs, principales victimes des effets du changement climatique, l'intégration des risques physiques fait ressortir un premier constat important : les secteurs agricoles et de production d'électricité partagent des mêmes facteurs d'exposition aux risques physiques. Mais au-delà des dommages directs qu'ils subiraient (baisse contrainte de la production), ils exposent l'ensemble de l'économie à un effet récessif systémique :

- Dépendant des services écosystémiques, les prix de marché de l'alimentation et de l'électricité accélèreraient fortement sous l'effet du réchauffement, des pénuries et des besoins d'importations additionnelles ; fournissant des biens essentiels aux agents, ils constitueraient les principales causes de l'inflation ressentie et de la hausse des coûts de production de l'ensemble de l'économie ;
- La consommation des autres biens et services sera directement affectée puisque celle-ci dépend du revenu disponible « après consommation contrainte ». Des secteurs a priori « épargnés » (comme les services) pourraient donc être directement impactés par la baisse du pouvoir d'achat ;
- Les autres secteurs pourront partiellement limiter leurs pertes en augmentant leurs prix de vente ; cette hausse de l'inflation pourrait ne pas être soutenable (sauf à alimenter encore plus une boucle prix-salaire et prix-marge) en particulier pour les secteurs soumis à une forte concurrence et qui sont *price takers*, faute de pouvoir répercuter l'inflation de leurs coûts sur leurs prix de vente. Cela pourrait causer des défaillances massives.

Effets croisés des risques physiques et de transition

Modéliser ensemble les actifs dépréciés par les dommages et par la transition contribuerait à surestimer les impacts macroéconomiques des seuls actifs échoués. En effet, en toute rigueur, les actifs immobiliers touchés (par la montée du niveau de la mer, les catastrophes naturelles ou le retrait-gonflement des argiles) devraient être exclus de la comptabilité des actifs échoués (puisque considérés dès lors à reconstruire dans des classes énergétiques plus performantes, donc « plus » échoués) ce qui n'a pas été fait dans cet exercice. Le scénario retardé surestime donc potentiellement l'ensemble des coûts du changement

4.2. Développer des scénarios à destination des acteurs économiques

À la fois applicables à des évaluations des politiques publiques, mais aussi aux nouveaux exercices de stress-tests climatiques (cf. **Encadré 4**), l'utilisation des fonctions de dommage permet de rendre compte au mieux de l'ensemble des contreparties d'un manque d'ambition des actions de transition au niveau mondial. Bien que les risques restent soumis à de très larges incertitudes et ne tiennent pas compte des événements extrêmes et leurs conséquences (points de basculement et boucles de rétroaction), développer de tels outils s'avère indispensable dans le cadre de l'analyse par scénarios.

Sur le risque de transition, les choix d'un modèle et d'une calibration spécifiques ne doivent pas cacher toutes les représentations possibles que la transition peut avoir (Boitier, et al., 2023). La représentation des instruments de transition pourrait être affinée, en particulier dans les scénarios dits « ordonnés », où le seul prix du carbone ne suffira pas pour traduire l'ensemble des mécanismes de décarbonation de certains secteurs comme l'industrie lourde. Les hypothèses d'accompagnement des politiques publiques (politique fiscale et budgétaire, politique monétaire notamment) doivent également être considérées avec précaution, celles-ci pouvant significativement influencer les trajectoires économiques.

Concernant les coûts additionnels, ils doivent être approfondis, à la fois sur la compréhension des impacts qu'auront les actifs échoués sur l'économie, mais aussi sur les questions d'adaptation du marché du travail : les études mobilisées dans ce rapport donnent une vision encore trop simplifiée des mécanismes d'adaptation des emplois et ont peut-être tendance à surestimer les risques, ne tenant pas compte par exemple des capacités d'adaptation des travailleurs ainsi que des systèmes de formation continue. Enfin, le retard pris dans l'implémentation des mesures nécessaires voue de plus en plus la transition vers la neutralité carbone à être « trop tardive et trop soudaine » (ESRB, 2016), ce qui replacerait de fait le scénario retardé comme le plus probable à moyen terme (bien que le plus défavorable économiquement).

Sur le risque physique, cette première estimation d'une fonction de dommages gagnera à être réévaluée et précisée en fonction de l'évolution de l'état de l'art et des outils de modélisation. Les impacts reposent pour l'instant essentiellement sur les dommages passant par le commerce extérieur. Les impacts domestiques sont très vraisemblablement encore sous-estimés, notamment car ils ne tiennent pas compte des coûts d'adaptation au changement climatique, non inclus dans le périmètre de l'étude (ex : gestion des périodes de canicule ou des feux de forêt, gestion des flux migratoires liés au changement climatique). Certains impacts potentiellement massifs liés aux risques chroniques dans le reste du monde gagneront également à être précisés.

Par ailleurs, l'ensemble des chocs sont ici introduits de manière tendancielle et linéaire pendant la période de transition, selon l'exemple des nouveaux exercices de supervision des risques climatiques (Allen, et al., 2020). En pratique, d'aucuns pourraient s'attendre à des chocs et corrections macroéconomiques brutaux, en particulier dans le cas d'une transition désordonnée, mais aussi à des événements extrêmes d'amplitude inattendue. Enfin, l'hypothèse de taux d'intérêt réels constants pourrait être mise à mal par la hausse brutale de la demande de capital induite par les dépréciations d'actifs (coûts échoués et changement climatique), ce qui aggraverait l'impact récessif des risques climatiques. De tels risques renforcent l'intérêt de développer, en parallèle de ces approches, des outils et scénarios de stress-tests climatiques de court terme pour tester la résilience des institutions face à ces menaces.

Développer des scénarios plus détaillés à destination de l'économie impliquerait de mobiliser des modèles multi-pays, afin de préciser les risques en termes d'échanges réels et financiers, et de préciser les impacts sectoriels des différents risques. Ces scénarios ne doivent enfin pas masquer les risques intrinsèques pour chaque acteur qui tendraient à être amoindris parmi les flux macroéconomiques considérés, mais auraient des impacts locaux très importants (exemple : la montée du niveau de la mer et les inondations fluviales). Si les stress-tests climatiques doivent se développer comme des outils de pilotage du risque, ils s'accompagneront également d'approches plus granulaires et individualisées.

Encadré 4 : Recommandations pour des stress-tests climatiques

Selon l'approche « bottom-up » retenue par l'ADEME, les impacts des scénarios de transition et des dommages climatiques sont très hétérogènes entre les secteurs et les agents. Il convient de différencier l'exposition de chacun d'entre eux aux différents risques de transition (ex : objectifs de décarbonation différenciée entre secteurs dans la SNBC) et aux risques physiques (ex : pertes de productivité plus marquées pour les secteurs dont les employés travaillent en extérieur), ce qui justifie l'utilisation d'un modèle macroéconomique multisectoriel.

Pour mesurer l'ensemble des coûts du changement climatique (et pas les seuls coûts directs), un modèle dynamique et bouclé permet de tenir compte de la montée en charge des risques (ex : hausse progressive des dégâts côtiers liés à l'élévation du niveau de la mer), des effets de propagation qui toucheraient d'autres agents (ex : moindre demande adressée aux secteurs non essentiels liés aux pénuries et à l'inflation alimentaires, hausse des coûts de production liés à l'inflation énergétique) et au bouclage macroéconomique (ex : effets « keynésiens » d'intensification du ralentissement économique et destructions d'emplois dans l'ensemble de l'économie). Si possible, ce modèle doit tenir compte des contraintes physiques, à la manière de ce qui a été fait dans la présente étude (cf. Encadré 2).

La prise en compte de l'ensemble des politiques de transition et des dommages dans un modèle multi-région permet de mesurer les effets précis du changement climatique sur le commerce extérieur, souvent négligés dans les modèles, ou bien parce que les études sont centrées sur des régions spécifiques, ou bien parce que les modèles tendent à surestimer les effets prix (ex : gains de compétitivité sur le reste du monde) par rapport aux effets revenu (ex : baisse contrainte de la production et du revenu chez les partenaires commerciaux qui affecte en retour la demande mondiale).

Concernant les dommages, la littérature fait souvent une distinction peu évidente entre les dommages marchands et les dommages « non-marchands ». Il convient de rappeler que tous les dommages peuvent avoir un potentiel effet, même indirect, sur le fonctionnement de l'économie, et doivent à ce titre être intégrés autant que faire se peut et à mesure que de nouvelles études d'impact deviennent disponibles. Les dommages non-marchands regroupent dans cette étude les dommages pour lesquels les conséquences économiques sont, ou trop incertaines, ou mal mesurées économiquement. Les pertes de biodiversité ont par exemple été classées comme telles et n'ont pas été incluses, bien que certaines études chiffrent leur coût global à une valeur supérieure au PIB mondial. Il convient néanmoins de distinguer risques chroniques et risques aigus, ces derniers pouvant être modélisés à partir de leurs coûts annuels moyens sur longue période.

Bien que cela n'ait pas été le cas dans cette étude, les coûts d'adaptation peuvent également être introduits. La modélisation doit alors être adaptée pour tenir compte du coût des dommages évités (ce qui n'était pas possible ici). Aussi, comme ces coûts d'adaptation sont introduits comme des dépenses nouvelles, il convient de les compenser par des économies ou des recettes additionnelles pour ne pas uniquement mesurer un effet macroéconomique positif. Comme il n'existe pas d'indication politique pour choisir les modalités de ces compensations, les effets macroéconomiques de l'adaptation dépendent alors de choix à la discrétion des modélisateurs.

Les coûts de reconstruction peuvent éventuellement être introduits, selon leur prise en compte ou non dans les modèles. Three-ME considère par exemple que la demande de logements privés est « contrainte » et que les ménages imposent une reconstruction rapide de leurs biens détruits, quel qu'en soit le prix ; au contraire, pour faire face aux dommages dans l'immobilier tertiaire, les entreprises vont procéder à un arbitrage qui dépend l'évolution de leur activité économique et de leurs coûts de production : entre une reconstruction, une substitution (ex : transfert de l'activité vers un nouveau site) ou un simple abandon de l'activité.

Enfin, il est nécessaire de rappeler que les trajectoires macroéconomiques en niveau (non présentées dans l'étude) dépendent des hypothèses de gains de productivité de long terme, qui à ce stade ne sont pas affectées par le coût des dommages. Les effets du changement climatique doivent uniquement être considérés « en variante », c'est-à-dire à une même date entre deux scénarios ; ces résultats

dépendent en effet peu du sentier de croissance retenu (défini ici par la somme de la croissance de la population active projetée par l'Insee et de l'hypothèse centrale de gain de productivité du Conseil d'orientation des retraites, de 1,0 % par an). Évaluer les effets « en niveau », c'est-à-dire entre deux dates et pour un même scénario (par exemple sur le niveau du PIB entre 2020 et 2100 ou sur la valorisation d'un actif financier) pourrait conduire à une mauvaise interprétation des résultats.

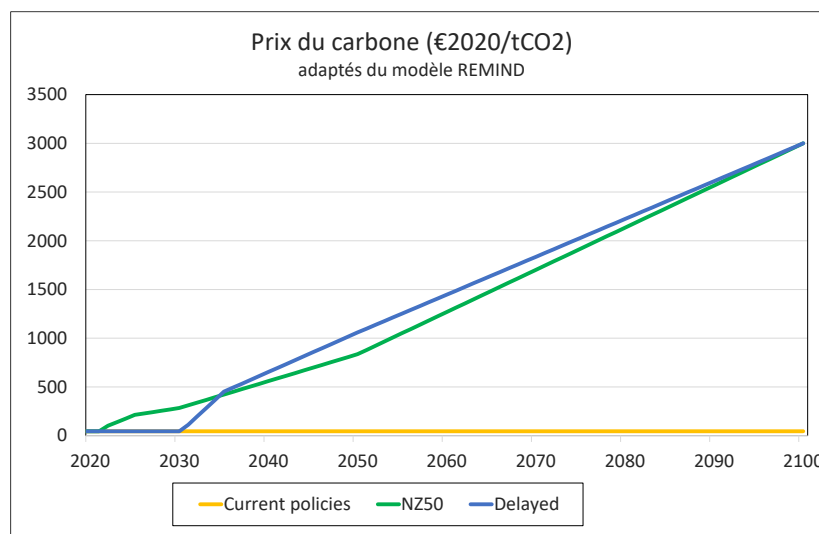
ANNEXE 1 : HYPOTHESES DES SCENARIOS DE TRANSITION

a) Hypothèses socioéconomiques et prix du carbone

Le sentier de croissance équilibré suit l'évolution des gains de productivité en France, fixés à 1% par an, soit la valeur moyenne projetée par le Conseil d'orientation des retraites (2021); et l'évolution de la population issue des projections démographiques de l'Insee (2017).

Les prix du carbone sont issus des hypothèses du NGFS du modèle REMIND-MAGPIE.

Figure 30 : Prix du carbone projetés dans les scénarios du NGFS



b) Mix énergétique

Tableau 6 : Mix énergétique projeté dans le scénario de transition ordonné

Net Zero 2050		2020	2030	2040	2050
Mix électrique	Charbon	2%	1%	1%	0%
	Gas	2%	2%	1%	0%
	Hydraulique	11%	11%	11%	10%
	Nucléaire	77%	63%	47%	32%
	Pétrole	2%	1%	1%	0%
	Solaire	1%	10%	19%	29%
	Eolien	4%	12%	20%	29%
Mix gaz	Biogaz	17%	41%	68%	95%
	Gas naturel	83%	59%	32%	5%
Mix carburant (transport)	Biocarburant	14%	39%	67%	95%
	Carburant	86%	61%	33%	5%
Mix carburant (bâtiment)	Biocarburant	0%	29%	62%	95%
	Carburant	100%	71%	38%	5%

Tableau 7 : Mix énergétique projeté dans le scénario de transition retardé

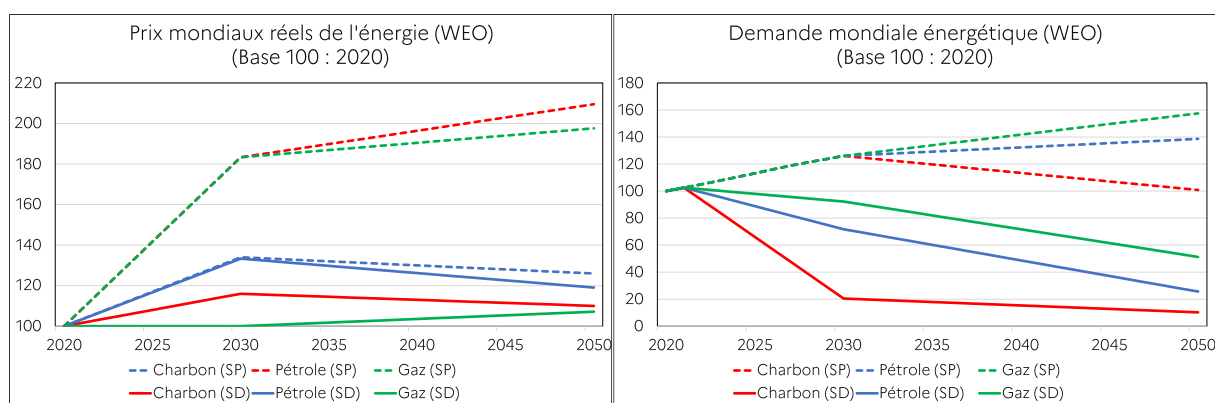
Delayed transition		2020	2030	2040	2050	2060
Mix électrique	Charbon	2%	2%	1%	1%	0%
	Gas	2%	2%	1%	1%	0%
	Hydraulique	11%	11%	11%	11%	10%
	Nucléaire	77%	77%	62%	46%	32%
	Pétrole	2%	2%	1%	1%	0%
	Solaire	1%	1%	11%	20%	29%
	Eolien	4%	4%	13%	21%	29%
Mix gaz	Biogaz	17%	17%	44%	71%	95%
	Gaz naturel	83%	83%	56%	29%	5%
Mix carburant (transport)	Biocarburant	14%	14%	42%	70%	95%
	Carburant	86%	86%	58%	30%	5%
Mix carburant (bâtiment)	Biocarburant	0%	0%	33%	66%	95%
	Carburant	100%	100%	67%	34%	5%

c) Hypothèses extérieures

La demande mondiale suit la somme des gains de productivité moyens projetés dans le reste du monde (maintenus constants à 1% par an, soit une estimation moyenne des gains de productivité par le Conseil d'orientation des retraites chez les principaux partenaires commerciaux européens ; et l'évolution de la population active issue du modèle REMIND-MAGPIE.

Les hypothèses énergétiques sont issues des projections du World Economic Outlook (2021) réalisées par l'AIE. Elles sont adaptées des scénarios AIE « Stated policies » (SP) pour le scénario d'inaction et « Sustainable development » (SD) pour les scénarios de transition.

Figure 31 : Prix énergétiques et demande mondiale énergétiques projetés par le WEO



d) Coûts échoués

À partir des travaux de l'IRENA (2017), qui anticipe près de 20 000 Mds\$ d'actifs échoués dans le monde en cas de transition retardée à 2030 (dont près de 6 500 Mds en Europe concentrés dans le secteur du bâtiment), il est estimé un total d'actifs échoués de près de 1 100 Mds\$ en France qui se matérialiseraient progressivement pendant la période de transition 2030-2050, soit près de 50 Md\$ additionnels chaque année (ou 2,1 pts de PIB) dont 2/3 concerneraient le parc résidentiel et 1/3 le secteur tertiaire.

À partir des travaux du NIESR (2021), qui anticipe au moins 120 000 Md\$ de pertes mondiales cumulées de productivité liées à l'inadéquation des compétences des travailleurs en cas de transition retardée, il est estimé des pertes annuelles en France jusqu'à 180 Md\$ liées à la productivité. Il est supposé que ces pertes se matérialiseraient progressivement et temporairement pendant la période de transition 2030-2050 (soit près de 0,3 pt additionnel annuel de productivité contrariée pour l'ensemble des travailleurs). Cette

hypothèse basse vise à compenser l'estimation sûrement trop pessimiste de l'étude, qui tend à sous-estimer les capacités d'adaptation des travailleurs.

ANNEXE 2 : IMPACTS MACROECONOMIQUES DES SCENARIOS CLIMATIQUES

- Scénario « Delayed »

en % d'écart au scénario "Net Zero 2050"	2030	2050
PIB	-1.63	-4.87
VA du secteur marchand	-1.82	-6.27
Consommation des ménages	-2.98	-1.27
Investissement	-2.33	-7.21
Exports	1.44	-10.37
Imports	-0.40	-0.65
Revenu disponible réel des ménages	-2.87	1.69
Prix à la consommation des ménages	-3.39	15.64
Prix à la production marchande	-3.19	17.94
Prix des exportations	-2.75	15.44
Prix des importations	0.32	0.21
Salaire net réel	-0.28	-1.87
Coût réel du travail	-0.58	-5.27
Emploi (en milliers)	-425	562
Taux de chômage (en points)	0.99	-1.23
Balance commerciale (en pts de PIB)	-0.52	1.14
Facture énergétique (en pts de PIB)	1.19	-0.27
Solde public primaire (en pts de PIB)	0.90	0.89

- Scénario « Current policies »

en % d'écart au scénario "Net Zero 2050"	2030	2050	2100
PIB	-1.51	-3.26	-6.58
VA du secteur marchand	-1.67	-3.83	-7.86
Consommation des ménages	-2.95	-4.70	-9.69
Investissement	-2.25	-7.18	-10.20
Exports	1.87	2.10	0.33
Imports	-0.26	-1.52	-4.03
Revenu disponible réel des ménages	-2.83	-4.32	-8.72
Prix à la consommation des ménages	-3.38	-3.87	-4.08
Prix à la production marchande	-3.18	-4.60	-6.22
Prix des exportations	-2.73	-3.43	-2.85
Prix des importations	0.32	-0.64	1.10
Salaire net réel	-0.28	-2.12	-3.05
Coût réel du travail	-0.58	-1.25	-2.26
Emploi (en milliers)	-407	-741	-1438
Taux de chômage (en points)	0.95	1.61	3.03
Balance commerciale (en pts de PIB)	-0.43	0.08	-0.06
Facture énergétique (en pts de PIB)	1.18	1.17	0.65
Solde public primaire (en pts de PIB)	0.86	1.56	2.47

ANNEXE 3 : PRINCIPALES FONCTIONS DE DOMMAGES SECTORIELLES

Tableau 8 : Dommages liés au niveau de la mer

	RCP4.5 + SSP1				RCP8.5 + SSP3				RCP8.5 + SSP5			
	2000	2030	2050	2080	2000	2030	2050	2080	2000	2030	2050	2080
Elévation de température (°c)	0,6	1,4	1,9	2,2	0,6	1,6	2,3	3,7	0,6	1,6	2,3	3,7
Ratio dommages France / Europe	10%	13%	16%	17%	10%	13%	17%	18%	10%	13%	17%	18%
EAD Europe (MM€/ an 2010)	1,3	7,5	21,0	80,9	1,3	5,3	12,5	45,2	1,3	9,3	39,4	293,8
EAD France (MM€/an 2010)	0,1	1,0	3,4	13,8	0,1	0,7	2,1	8,1	0,1	1,2	6,6	53,0
Ratio EAD / PIB France	0,01%	0,04%	0,09%	0,24%	0,01%	0,03%	0,08%	0,29%	0,01%	0,05%	0,14%	0,51%

Source : à partir de (Vousdoukas, Mentaschi, Voukouvalas, & Feyen, 2019).

Tableau 9 : Dommages liés aux rendements agricoles

Elévation de température (°C)	1	2	3	4	5
Rendements blé	100%	94%	88%	83%	78%
Rendements maïs	100%	97%	95%	92%	90%
Rendements moyens	100%	95%	90%	85%	81%

Source : à partir de (Zhao, et al., 2017).

Note : Il est retenu une répartition productive $\frac{3}{4}$ blé et $\frac{1}{4}$ maïs pour une ferme française.

Tableau 10 : Dommages liés à la productivité du travail

Pertes de productivité (en %)	2021-2050	2071-2100	2°C	2021-2050	2071-2100	2°C
Modèles	Extérieur			Intérieur		
Delta1	-0,1	-1,1	-0,4	0	-0,7	-0,2
Delta2	-1,7	-7,8	-2	-0,5	-4,3	-0,9
Delta3H	-0,6	-3,7	-0,9	-0,2	-1,6	-0,3
Delta4	-0,8	-4,2	-1,1	-0,3	-2,3	-0,5
Delta5	-0,3	-1,4	-0,5	-0,2	-1	-0,3
Moyenne	-0,3	-1,4	-0,5	-0,2	-1	-0,3

	RCP 8.5			
	1981-2010	2021-2050	2071-2100	2°C
Elévation de température (°C)	0,68	1,75	3,78	2,00
Productivité du travail en intérieur	100%	100%	96%	99%
Productivité du travail en extérieur	100%	98%	92%	98%
Moyenne travail	100%	99%	95%	99%

Source : à partir de (Gosling, Zaherpour, & Ibarreta, 2018).

Tableau 11 : Dommages liés aux catastrophes naturelles dans le monde

	Référence	RCP2.6			RCP4.5		
	1990-2015	2020-2040	2041-2070	2071-2100	2020-2040	2041-2070	2071-2100
Elévation de température (°C)	0,8	1,4	1,6	1,6	1,7	2,0	2,3
Impact sur les exports (%)	0	-13,1	-13,4	-12,1	-12,4	-14,8	-15,8

Source : à partir de (Schleypen, et al., 2019)

ANNEXE 4 : COUT DES CATASTROPHES NATURELLES EN FRANCE

Year	Disaster Type	Disaster Subtype	Event Name	Location	Total damages (Md\$)
1999	Storm	Extra-tropical storm	Lothar	South-Western, Western	13,01
1999	Storm	Extra-tropical storm	Martin		6,51
2003	Extreme temperature	Heat wave		All regions	6,48
2021	Extreme temperature	Cold wave		Rhône region	5,60
2010	Storm	Extra-tropical storm	Xynthia	Charente-Maritime, Vienne, Deux-Sèvres districts (Poitou-Charentes province), Vendée district (Pays-de-la-Loire province)	5,26
2017	Storm	Tropical cyclone	Hurricane 'Irma'	Saint Martin (French Part)	4,53
1987	Storm			Bretagne, Normandie	4,05
2009	Storm	Extra-tropical storm	Klaus	Landes, Pyrénées-Atlantiques, Lot-et-Garonne district (Aquitaine province), Hautes-Pyrénées, Gers, Haute-Garonne (Midi-Pyrénées province), Aude, Pyrénées Orientales (Languedoc-Rousillon province)	4,04
1989	Drought	Drought		Corse	3,50
2016	Flood			Yvelines, Paris districts (Ile-de-France province), Marne district (Champagne-Ardenne), Manche, Calvados districts (Basse-Normandie province), Orne, Eure, Seine-Maritime (Haute-Normandie province)	2,71
2003	Flood	Flash flood		Herault, Gard districts (Languedoc-Rousillon province), Bouches-du-Rhone, Vaucluse districts (Provence-Alpes-Cote-d'Azur province) (South and East)	2,21
1990	Storm		Herta		1,87
2010	Flood	Flash flood		Draguignan, Les Arcs, Figanières, Roquebrune sur Argens, Luo, Muy, Trans cities (Var district, Provence-Alpes-Cote-d'Azur province)	1,86
2002	Flood	Riverine flood		Gard, Hérault districts (Languedoc-Rousillon province), Vaucluse district (Provence-Alpes-Cote-d'Azur province), Rhone, Drome, Ardeche districts (Languedoc-Rousillon province)	1,79
1983	Flood	Riverine flood		North, East	1,64
1991	Extreme temperature	Cold wave		Champagne, Cognac, Provence, Touraine, Bordeaux	1,54
1995	Storm		Thaila, Urania, Valeska, Wilma	Basse-Normandie, Champagne-Ardennes, Bretagne, Pays de Loire, Ile-de-France	1,24
1988	Flood	Flash flood		Nimes (Gard)	1,15
1993	Flood	Riverine flood			1,13
2015	Flood	Flash flood		Côte d'Azur region (Alpes-maritimes, Var districts, Provence-Alpes-Cote-d'Azur province)	1,06
2020	Storm	Convective storm	Storm 'Alex'	Roya Valley, Vésubie, Tinée (Provence-Alpes-Côte d'Azur Region)	1,01
1982	Storm			Seine, Saone, Charente, Loire departments	0,98
1993	Storm			Alps, Vaucluse, Drome	0,94
1990	Storm		Daria		0,83
1999	Flood	Flash flood		Aude, Tarn, Herault, Pyrenees-Orientales	0,81
1992	Storm	Convective storm		Vaucluse, Drome, Ardeche	0,77
2013	Flood	Flash flood		Luz-Saint-Sauveur city (Hautes Pyrénées district), Saint-Béat city, (Haute-Garonne district) (Midi-Pyrenees province) ; Garonne, Pique rivers (Haute-Garonne district, Midi-Pyrenees province) ; Pyrenees-Atlantiques district (Aquitaine province)	0,76
2017	Storm	Extra-tropical storm	'Zeus'	Brittany, Provence, Sud-Ouest (Brive), Alpes du Sud, Centre et Sud-Est.	0,61
1966	Storm	Tropical cyclone	Inez	Guadeloupe	0,58
1990	Storm		Wiebke		0,48
1990	Storm		Vivian		0,41
2018	Flood			Ile-de-France	0,40

Year	Disaster Type	Disaster Subtype	Event Name	Location	Total damages (Md\$)
2007	Storm	Tropical cyclone	Dean	Guadeloupe	0,39
2007	Storm	Tropical cyclone	Dean	Fort-de-France, La Trinite, Saint-Pierre, Le Marin provinces	0,39
1979	Storm	Tropical cyclone	David	Guadeloupe	0,37
2018	Flood			Carcassonne, Conques sur Orbiel, Aragon, Berriac, Trbes, Flore, Villegaihen, Villemoustaussou, Villalier (Aude, Hérault)	0,37
1963	Storm	Tropical cyclone	Edith	Martinique	0,35
2014	Flood	Flash flood		Argeles city (Pyrénées-Orientales district, Languedoc-Rousillon province); Pyrénées-Orientales, Aude, Gar districts (Languedoc-Rousillon province), Var district (Provence-Alpes-Cote-d'Azur province)	0,35
2019	Storm	Convective storm		Var, Alpes Maritimes, Puy de Dome departments.	0,33
2007	Storm	Extra-tropical storm	Kyrill	Alsace, Basse-Normandie, Bourgogne, Bretagne, Centre, Champagne-Ardenne, Franche-Comte, Haute-Normandie, Ile-de-France, Lorraine, Nord-Pas-de-Calais, Pays-de-la-Loire, Picardie provinces	0,33
1995	Storm	Tropical cyclone	Marilyn	Martinique	0,28
1998	Storm	Extra-tropical storm	Cilly, Desiree, Fanny	Bretagne, Ouest de la France	0,25
1980	Storm	Tropical cyclone	Allen	Martinique	0,22
1980	Storm	Tropical cyclone	Hyacinthe	Réunion	0,22
1970	Storm	Tropical cyclone	Dorothy	Martinique	0,22
2018	Storm	Convective storm	Eleanor	Alps, Morillon (Haute Savoie), Corse, Savoie, Isère, Cambrai (Nord), Paris region (Ile-de-France), Seine Maritime, Pas de Calais, Haute Marne, Manche, Bretagne, Lucenay-Lévêque (Saône et Loire)	0,22
2014	Storm	Convective storm		Lamalou-les-Bains city (Herault district, Languedoc-Rousillon province) ; Aveyron distric (Midi-Pyrénées province), Gard district (Languedoc-Rousillon province) Ardeche district (Rhone-Alpes province)	0,21
2001	Flood	Riverine flood		Calvados district (Basse-Normandie province), Seine-Maritime, Eure districts (Haute-Normandie province), Meuse district (Lorraine province), Haute-Marne district (Champagne-Ardenne province), Rhone district (Rhone-Alpes province), Doubs district (Franche-Comte province), Oise district (Picardie province), Finistère, Ile-et-Vilaine districts (Bretagne province) ; Mâcon, Chalons-sur-Saône cities (Saone-et-Loire district, Bourgogne province), Nantes city (Loire-Atlantique district, Pays-de-la-Loire province), Montbazou (Indre-et-Loire district, Centre province)	0,20
1979	Storm	Tropical cyclone	David	Martinique	0,19
1994	Flood			Lozere, Guard, Herault	0,17
1967	Storm	Convective storm		North	0,16
2017	Storm	Tropical cyclone	Hurricane 'Maria'	La Desirade Island	0,13
1990	Storm		Judith		0,12
1990	Storm		Nana		0,12
1990	Storm		Ottillie and Polly		0,12
1989	Storm	Tropical cyclone	Hugo	Guadeloupe	0,11
1989	Storm	Tropical cyclone	Firinga	Southwest Isl.	0,11
2019	Storm			Pyrénées-Atlantiques, Landes, Lot-et-Garonne, Gironde, Gers departments	0,11
2008	Storm	Convective storm		Hautmont city (Nord distric, Nord-Pas-de-Calais province)	0,10
2014	Storm	Tropical cyclone	Cyclone Beisja	Arrondissement du vent, Arrondissement sous le vent provinces	0,10
1993	Storm	Convective storm		South West - Saonne et Loire	0,09
1995	Storm	Tropical cyclone	Luis	Guadeloupe	0,09
2002	Storm	Tropical cyclone	Dina	Arrondissement du vent, Arrondissement sous le vent provinces	0,08

Year	Disaster Type	Disaster Subtype	Event Name	Location	Total damages (Md\$)
2003	Storm	Tropical cyclone	Erica	Noumea, Bourail areas (South region), Kone area (North region)	0,06
1983	Storm	Tropical cyclone	Veena	Moorea/Tetisura	0,06
2020	Flood	Flash flood		Valleraugue (Gard department); Lozère and Hérault departments	0,06
2017	Storm	Tropical cyclone	Hurricane 'Maria'	Le Morne-rouge, Le Carbet (St Pierre), Le Marigot, Gros-Morne (La Trinité), Northern coast, Fort-de-France, Schoelcher (Fort de France)	0,05
1983	Storm	Tropical cyclone	Orama	Tuomoto	0,04
2021	Flood			Nouvelle-Aquitaine; Occitanie; Landes; Pyrénées-Atlantiques	0,02
1969	Storm	Tropical cyclone	Colleen	Near Ouvéa Is.	0,02
1999	Landslide	Avalanche		Hameaux de Montroc et Du Tour	0,02
1997	Drought	Drought			0,02
1983	Flood			Basque region	0,01
2005	Wildfire	Forest fire		Gardanne, Aix en Provence, Meyreuil, Lançon-de-Provence, Val-de-Cibourg (Bouches du Rhône), Calvi, Calenzana, Haut Nebbio, Pieve, Vallecalle, Murato, Montemaggiore, Montegrosso, Zilia, Avapessa et Aregno (Haute Corse), Saint-Zacharie, Draguignan, Saint-Tropez, Vidauban, Mux (Var), Meze (Hérault)	0,01
2010	Storm	Tropical cyclone	Cyclone "Oli"	Tubuai island (Australes archipelagos), Bora Bora, Maupiti, Raiatea, Tahaa, Huahine islands (Îles sous le Vent group), Tahiti, Moorea, Maïao island (Îles du vent group)	0,01
1996	Flood	Flash flood		Beziers, Puisserguier, Cassenon, Agde, Serignan, Puissalicon, Magalas (Hérault Department, Languedoc-Roussillon province)	0,01
2021	Flood			Charente-Maritime Department, Lot-et-Garonne Department, Gironde Department (Nouvelle-Aquitaine Region)	0,01
1994	Flood	Riverine flood		Camargue	0,01
1998	Storm	Tropical cyclone	Georges	Guadeloupe	0,01
1959	Storm	Tropical cyclone	Beatrice	Southern New Caledonia	0,01
1987	Storm	Tropical cyclone		Saint Denis	0,00
2017	Flood			Tahiti, Moorea	0,00
2002	Storm	Extra-tropical storm	Jeanett	Eure district (Haute-Normandie province), Manche, Calvados districts (Basse-Normandie province), Pas-de-Calais district (Nord-Pas-de-Calais province), Somme district (Picardie province), Seine-Maritime district (Haute-Normandie province), Seine-Saint-Denis district (Île-de-France province)	0,00
1981	Storm	Tropical cyclone	Gyan	New Caledonia	0,00
2003	Storm	Extra-tropical storm	Calvann	Alsace, Champagne-Ardenne, Franche-Comte, Lorraine provinces (Nord-East region)	0,00
1996	Storm	Tropical cyclone	Lilli		0,00
1996	Storm	Tropical cyclone	Hortense	Martinique	0,00

Source : EM-DAT (2021). Catastrophes recensées avec un coût des dommages positifs, classé par ordre décroissant.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aaheim, A., Amundsen, H., Dokken, T., & Wei, T. (2012). Impacts and adaptation to climate change in European economies. *Global Environmental Change, Volume 22 Issue 4*, pp 959-968.
- ADEME. (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. (2020). *Le captage et stockage géologique de CO₂ (CSC) en France : un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles*. Les avis de l'ADEME.
- ADEME. (2022). *Transitions 2050 - Feuilleton : Les effets macroéconomiques*. Horizons.
- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., & al. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future, 5*, pp 171-182.
- Alfieri, L., Dottori, F., Betts, R., Salamon, P., & Feyen, L. (2018). Multi-Model Projections of River Flood Risk in Europe under Global Warming. *Climate, 6*.
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., & Bianchi, A. (2015). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change, 35*, pp 195-212.
- Allen, T., Dees, S., Boissinot, J., Caicedo Graciano, C., Chouard, V., & al. (2020). Climate-Related Scenarios for Financial Stability Assessment: an Application to France. *Banque de France Working Paper Series no. 774*.
- Bank of England. (2021). *Key elements of the 2021 Biennial Exploratory Scenario: Financial risks from climate change*.
- Berrittella, M., Bigano, A., Roson, R., & Tol, R. (2004). *A General Equilibrium Analysis of Climate Change Impacts on Tourism*. Nota di Lavoro 127.2004, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Bigano, A., Bosello, F., Roson, R., & Tol, R. (2006). *Economy-Wide Estimates of the Implications of Climate Change: A Joint Analysis for Sea Level Rise and Tourism*. Fondazione Eni Enrico Mattei Working Paper N.135.2006.
- Boitier, B., Le Mouël, P., Zagamé, P., Callonec, G., Garnero, M., Jacquetin, F., & al. (2023). *Risques de transition : une analyse multi-modèles pour la France*. ADEME Expertises.
- Bosello, F., Bigano, A., Roson, R., & Tol, R. (2006). *Economy-Wide Estimates of the Implications of Climate Change: A Joint Analysis for Sea Level Rise and Tourism*. Nota di Lavoro 135.2006, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Bosello, F., Eboli, F., & Pierfederici, R. (2012). *Assessing the Economic Impacts of Climate Change*. Nota di lavoro 2.2012, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- Bosello, F., Lazzarin, M., Roson, R., & Tol, R. (2004). *Economy-Wide Estimates of the Implications of Climate Change: Sea Level Rise*. Nota di Lavoro 96.2004.
- Bosello, F., Roson, R., & Tol, R. (2004). *Economy-wide Estimates of the Implications of Climate Change: Human Health*.
- Burns, A., Jooste, C., & Schwerhoff, G. (2021). *Climate Modeling for Macroeconomic Policy - A Case Study for Pakistan*. Policy Research Working Paper 9780.
- Burns, A., Jooste, C., & Schwerhoff, G. (2021). *Macroeconomic Modeling of Managing Hurricane Damage in the Caribbean - The Case of Jamaica*. Policy Research Working Paper 9505.
- Callonnec, G., & Cancé, R. (2022). *Evaluation macroéconomique de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2) avec le modèle ThreeME*. Document de travail.
- Callonnec, G., & Combaud, M. (2019). *Les effets macroéconomiques et environnementaux de la fiscalité carbone*. Rapport particulier n°4, Conseil des Prélèvements Obligatoires.
- 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.

- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2021). *Cred Crunch 63 - Missing data on economic losses variables from EM-DAT*. Issue No. 63.
- Ciscar Martinez, J., & al. (2014). *Climate Impacts in Europe - The JRC PESETA II Project*. JRC Scientific and Policy Reports.
- Ciscar, J.-C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., & al. (2011). *Physical and economic consequences of climate change in Europe*. PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE UNITED STATES OF AMERICA 108.
- Conseil d'orientation des retraites. (2021). *Quelles sont les raisons du ralentissement de la croissance de la productivité ?* Document de travail n°4, Séance plénière du 25 novembre 2021 à 10h00 « Choix des hypothèses économiques de long terme », Secrétariat général du Conseil d'orientation des retraites.
- De Cian, E., & Sue Wing, I. (2017). Global Energy Consumption in a Warming Climate. *Environ Resource Econ* 72, 365–410.
- Deke, O., Hooss, K., Kasten, C., Klepper, G., & Springer, K. (2001). *Economic Impact of Climate Change: Simulations with a Regionalized Climate-Economy Model*. Kiel Working Paper No. 1065.
- Dellink, R., Hwang, H., Lanzi, E., & Chateau, J. (2017). *International trade consequences of climate change*. OECD Trade and Environment Working Papers 2017/01.
- Eboli, F., Parrado, R., & Roson, R. (2009). *Climate Change Feedbacks on Economic Growth: Explorations with a Dynamic General Equilibrium Model*. Nota di lavoro 43.2009, Fondazione Eni Enrico Mattei.
- 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.
- Gosling, S. N., Zaherpour, J., & Ibarreta, D. (2018). *PESETA III: Climate change impacts on labour productivity*. EUR 29423 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Gourdier, S., & Plat, E. (2018). Impact du changement climatique sur la sinistralité due au retrait-gonflement des argiles. *Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG)*. Champs-sur-Marne.
- Hourcade, J.-C., Gherzi, F., Grandjean, R., Lefèvre, J., Tankov, P., & Voisin, S. (2021). Scénarios et modèles économie-climat : une grille de lecture pour la finance durable. *Opinions & Débats N°23*.
- Howard, P., & Sterner, T. (2017). Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimates. *Environmental and Resource Economics*, 68, pp 197–225.
- IEA. (2015). *World Energy Outlook*.
- IEA. (2021). *World Energy Outlook*.
- 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.
- IRENA. (2017). *Stranded Assets and Renewables - How the energy transition affects the value of energy reserves, buildings and capital stock*. Working paper based on REmap analysis.
- Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S., Vautard, R., & al. (2018). Climate Impacts in Europe Under +1.5°C Global Warming. *Earth's Future*, 6, pp 264–285.
- Jacquetin, F. (2021). *Stress-tests climatiques par scénarios : de l'analyse des risques à la modélisation*. Ademe Expertises.

- Kalkuhl, M., & Wenz, L. (2020). The impact of climate conditions on economic production. *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 103.
- Kitous, A., & Després, J. (2018). *Assessment of the impact of climate change on residential energy demand for heating and cooling*. JRC Science for Policy Report EUR 29084 EN, Joint Research Center, Luxembourg.
- Kompass, T., V.H., P., & Che, T. (2018). The Effects of Climate Change on GDP by Country and the Global Economic Gains From Complying With the Paris Climate Accord. *Earth's Future*, 6, pp 1153-1173.
- Lafakis, C., Ratz, L., Fazio, E., & Cosma, M. (2019). *The Economic Implications of Climate Change*. Moody's Analytics.
- 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.
- Mahfouz, S., Murciano, C., Brand, T., & Costa de Beauregard, A. (2022). *Enjeux macroéconomiques et budgétaires de la neutralité carbone*. Rapport public n° 2022-M-037-04, Inspection générale des finances.
- Mercure, J.-F., Chester, D., Lynch, C., Jarvis, S., & Jarvis, A. (2021). Stranded Human and Produced Capital in a Net-Zero Transition. *Rebuilding Macroeconomics Working Paper Series No. 54*.
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. (2020). *Stratégie Nationale Bas Carbone - Rapport d'accompagnement*.
- NGFS. (2019). *Climate Scenarios Database - Technical Documentation*.
- NGFS. (2021). *Climate Scenarios Database - Technical Documentation V2.1*.
- NGFS. (2021). *NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors*.
- Nordhaus, W., & Moffat, A. (2017). *A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis*. Working Paper Series 23646, National Bureau of Economic Research.
- OECD. (2015). *Les conséquences économiques du changement climatique*. OECD Publishing, Paris.
- Paci, D. (2014). *Human Health Impacts of Climate Change in Europe*. JRC Technical Report EUR 26494, European Commission, Joint Research Center.
- Pindyck, R. S. (2017). The Use and Misuse of Models of Climate Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100-114.
- Pisani-Ferry, J., & Mahfouz, S. (2023). *Les incidences économiques de l'action pour le climat*. Rapport à la Première Ministre, France Stratégie.
- Reilly, J., Paltsev, S., Strzepek, K., Selin, N., Cai, Y., & al. (2012). Valuing climate impacts in integrated assessment models: the MIT IGSM. *Volume 117*, 561–573.
- Reynès, F., Callonnec, G., Saussay, A., Landa, G., Malliet, P., & al. (2021). *ThreeME Version 3 Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy Policy - A full description*.
- Riahi, K., van Vuuren, D., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B., & al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 53–168.
- Roson, R., & Mensbrugge, v. d. (2010). *Climate Change and Economic Growth: Impacts and Interactions*. Dept. of Economics Research Paper Series No. 07_10, University Ca' Foscari of Venice.
- Roson, R., & Sartori, M. (2015). *Estimation of climate change damage functions for 140 regions in the GTAP database*.

- Schleypen, J., Dasgupta, S., Borsky, S., Jury, M., Ščasný, M., & Bezhanishvili, L. (2019). *D2.4 Impacts on Industry, Energy, Services, and Trade*. Deliverable of the H2020 COACCH project.
- Solow, R. M. (1956). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94.
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., & al. (2019). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13, pp 1325–1347.
- TCFD. (2017). *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*.
- Tobin, I., Greuell, W., Jerez, S., Ludwig, F., Vautard, R., van Vliet, M., & Breon, F.-M. (2017). Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 °C, 2 °C and 3 °C warming. *Environmental Research Letters* 13 044024.
- Vousdoukas, M., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., & Feyen, L. (2019). *PESETA III – Task 8: Coastal Impacts*. EUR 28243 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Zhao, C., Bing, L., Piao, S., Wang, X., Lobell, D., & al. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), pp 9326-9331.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Comparaison et limitations des méthodologies d'estimation	8
Tableau 2 : Revue des impacts macroéconomiques des risques physiques en Europe issus de l'approche « bottom-up »	10
Tableau 3 : Sélection des dommages sectoriels ayant un impact macroéconomique significatif.....	20
Tableau 4 : Classification des risques physiques	20
Tableau 5 : Comparaison des hypothèses de transition et d'accompagnement.....	45
Tableau 6 : Mix énergétique projeté dans le scénario de transition ordonné	52
Tableau 7 : Mix énergétique projeté dans le scénario de transition retardé.....	53
Tableau 8 : Dommages liés au niveau de la mer.....	57
Tableau 9 : Dommages liés aux rendements agricoles.....	57
Tableau 10 : Dommages liés à la productivité du travail.....	57
Tableau 11 : Dommages liés aux catastrophes naturelles dans le monde	57

FIGURES

Figure 1 : Méthodologie de modélisation macroéconomique des risques climatiques	13
Figure 2 : Impact macroéconomique et sectoriel d'une baisse des rendements agricoles de 10 %.....	15
Figure 3 : Fonction de dommages sectorielle – Température de l'air et productivité du travail	22
Figure 4 : Fonction de dommages sectorielle – Rendements agricoles.....	22
Figure 5 : Fonction de dommages sectorielle – Niveau de la mer.....	23
Figure 6 : Fonction de dommages sectorielle – Demande énergétique.....	24
Figure 7 : Fonction de dommages sectorielle – Production d'électricité	24
Figure 8 : Fonction de dommages sectorielle – Demande touristique.....	25
Figure 9 : Fonction de dommages sectorielle – Retrait-gonflement des argiles.....	25
Figure 10 : Fonction de dommages sectorielle – Maladie.....	26
Figure 11 : Recensement des catastrophes naturelles en France et de leur coût économique.....	27
Figure 12 : Coût moyen des catastrophes naturelles en France par type d'évènement.....	28
Figure 13 : Fonction de dommages sectorielle – Catastrophes naturelles en France.....	28
Figure 14 : Fonction de dommages sectorielle – Catastrophes naturelles dans le monde.....	29
Figure 15 : Fonction de dommages ADEME.....	31
Figure 16 : Impacts sectoriels des dommages du changement climatique dans un scénario d'inaction ..	32
Figure 17 : Comparaison des fonctions de dommage	32
Figure 18 : Cadre analytique du NGFS.....	33
Figure 19 : Scénarios et narratifs du NGFS.....	34
Figure 20 : Stratégie de modélisation des scénarios de transition.....	36
Figure 21 : Hausse de la température moyenne mondiale selon les scénarios du NGFS.....	36

Figure 22 : Impact macroéconomique du scénario de transition « Net Zero 2050 » (avec risques physiques)..... 37

Figure 23 : Impacts sectoriels détaillés du scénario « Net Zero 2050 » (avec risques physiques)..... 38

Figure 24 : Impact macroéconomique du scénario désordonné « Delayed transition »41

Figure 25 : Impacts sectoriels détaillés du scénario désordonné retardé41

Figure 26 : Comparaison des scénarios de transition avec les scénarios du NGFS..... 43

Figure 27 : Estimation du total des actifs échoués mondiaux dans un scénario retardé..... 44

Figure 28 : Impact macroéconomique du scénario d'inaction « Current policies »..... 46

Figure 29 : Impacts sectoriels détaillés du scénario d'inaction « Current policies » 47

Figure 30 : Prix du carbone projetés dans les scénarios du NGFS 52

Figure 31 : Prix énergétiques et demande mondiale énergétiques projetés par le WEO 53

SIGLES ET ACRONYMES

Net Zero 2050	Scénario de transition mondiale ordonnée, où les politiques climatiques sont introduites dès 2020, graduelles et anticipées et le réchauffement limité à 1,5 °C.
Delayed	Scénario de transition mondiale désordonnée, où après une poursuite du développement des énergies fossiles, les politiques climatiques débutent soudainement et brutalement en 2030 pour limiter le réchauffement à 2°C.
Current policies	Scénario dit de « politique inchangée », où seules les politiques déjà implémentées se mettent en œuvre, conduisant à un réchauffement supérieur à 3°C.

ADEME	Agence de la transition écologique
AIE	Agence internationale de l'énergie
CGE	Modèle d'équilibre général calculable
CSC	Capture et séquestration du carbone
EM-DAT	Base de données internationales sur les situations d'urgence
GHG	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IAM	Modèle d'évaluation intégrée
IRENA	Agence internationale pour les énergies renouvelables
NGFS	Réseau des banques centrales et des superviseurs pour le verdissement du système financier
RCP	Profil de concentration représentatif
SNBC	Stratégie nationale bas carbone
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 Energétiques
WEO	World Energy Outlook

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.



LES RISQUES CLIMATIQUES ET LEURS COÛTS POUR LA FRANCE

Une évaluation macroéconomique

L'ADEME présente une version modifiée de son modèle Three-ME pour intégrer l'ensemble des risques climatiques. Une revue de littérature approfondie est menée pour estimer des fonctions de dommages sectorielles et évaluer le coût des dommages du changement climatique en France. L'inaction pourrait coûter jusqu'à 7 points de PIB à horizon 2100

Ces extensions méthodologiques permettent de simuler plusieurs scénarios de transition globaux et d'évaluer simultanément l'impact combiné des risques physiques et des risques de transition. Elles visent à enrichir les futures projections institutionnelles, mais aussi à servir de propositions pour de futurs stress-tests climatiques par les entreprises et institutions financières.

Le projet 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, et (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.

Le consortium coordonné par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, comprend également le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, l'Autorité des marchés financiers, l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution, 2^e Investing Initiative, Institut de l'Economie pour le Climat, Finance for Tomorrow et GreenFlex.

Finance ClimAct est un programme inédit d'un budget total de 18 millions d'euros et doté de 10 millions de financement par la Commission Européenne.

Durée : 2019-2024

Ce projet a reçu un financement du programme LIFE de l'Union Européenne, sous la convention de subvention LIFE18IPC/FR/000010 A.F.F.A.P. La Commission Européenne ne peut être tenue responsable de l'utilisation qui peut être faite des informations que cette note contient.

Ce rapport ne reflète que les visions des auteurs. Les membres du consortium Finance ClimAct ne peuvent être tenus responsables de l'utilisation qui peut être faite des informations de ce rapport.

