

Impact macroéconomique des dommages climatiques en France

Macroeconomic Impact of Climate Damage in France

Florian Jacquetin* et Gaël Callonnec*

Résumé – Pour évaluer le coût économique de l'inaction climatique, nous introduisons le coût des dommages dans le modèle macroéconomique « Three-ME » de l'ADEME. Le cadre traditionnel « keynésien » du modèle a été modifié pour tenir compte des risques pesant sur certains secteurs (agriculture, électricité) qui entraîneraient des baisses contraintes de leur production. Les dommages incluent à la fois les risques chroniques, découlant de changements graduels, et les risques aigus découlant d'événements courts de forte intensité comme les catastrophes naturelles. Ces dommages sont introduits de manière « *bottom-up* », c'est-à-dire à la fois au niveau de l'offre et de la demande des agents concernés. Selon les simulations, par rapport à une transition anticipée et planifiée limitant le réchauffement à 1,5 °C d'ici 2100, l'inaction climatique pourrait coûter près de 7 points de PIB annuels à la France à l'horizon 2100.

Abstract – In order to assess the economic cost of climate inaction, we introduce the cost of the damage into the “ThreeME” macroeconomic model devised by ADEME (the French Agency for Ecological Transition). The traditional “Keynesian” framework of the model has been modified to take into account the risks weighing on certain sectors (agriculture and electricity) that would lead to pressures causing reductions in their productivity. The damage includes not only chronic risks resulting from gradual changes, but also acute risks resulting from high intensity events of short duration, such as natural disasters. This damage is introduced in a “bottom-up” approach, i.e. at the level of both the supply and the demand of the stakeholders concerned. According to the simulations, compared to an anticipated and planned transition limiting global warming to 1.5°C by 2100, climate inaction could cost France almost 7 points of annual GDP by 2100.

JEL : Q54, Q43, O13, E12, E17

Mots-clés : modélisation macroéconomique, changement climatique, coût des dommages, risques physiques, analyse par scénarios

Keywords: macroeconomic modelling, climate change, cost of damage, physical risks and scenario

* Agence de la transition écologique. Correspondance : florian.jacquetin@gmail.com

Les auteurs remercient Hervé Gouédard (ADEME), Mathieu Garnero (ADEME), Patrick Jolivet (ADEME) et Albertine Devillers (Corps des Mines) pour leurs contributions respectives, ainsi que les économistes de la Banque de France Thomas Allen, Stéphane Dees, Annabelle de Gaye et Noémie Lisack pour le partage des hypothèses macroéconomiques relatives aux scénarios de transition du NGFS.

Reçu en juin 2023, accepté en février 2024.

Les jugements et opinions exprimés par les auteurs n'engagent qu'eux-mêmes, et non les institutions auxquelles ils appartiennent, ni a fortiori l'Insee.

Citation: Jacquetin, F. & Callonnec, G. (2024). Macroeconomic Impact of Climate Damage in France. *Economie et Statistique / Economics and Statistics*, 543, 39–64. doi: 10.24187/ecostat.2024.543.2118

L'analyse de scénarios constitue une méthode privilégiée par les organisations gouvernementales et internationales pour anticiper, planifier et estimer les conséquences des nombreux futurs climatiques possibles. Ce type d'analyse souffre cependant de nombreuses limites méthodologiques : autour du réalisme des scénarios envisagés (incertitude politique), de l'évolution future des températures (incertitude climatique) et des conséquences économiques associées (incertitude d'impact). En France, c'est la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), feuille de route vers la décarbonation à laquelle sont associés des effets macroéconomiques. Selon cette évaluation (Callonnec & Cancé, 2022), la transition vers la neutralité carbone pourrait rehausser le PIB national de 3 à 4 points à horizon 2050. Ce scénario, s'il reste ouvert au débat (ADEME, 2020), n'intègre pas le coût des dommages du changement climatique et ne permet pas d'évaluer tous les bénéfices d'une action climatique ambitieuse.

Pour quantifier le coût des dommages, les économistes ont pu mobiliser des modèles dits « macroenvironnementaux ». Ce type de modèle associe un modèle macroéconomique traditionnel à une représentation du climat. Historiquement, les premiers modèles macroenvironnementaux furent les modèles d'évaluation intégrée (MEI). En 1992, l'économiste américain William Nordhaus développait la première version du modèle DICE (*Dynamic Integrated Climate Economics*), modèle d'équilibre général et intertemporel intégrant à la fois les coûts liés à l'atténuation (c'est-à-dire les actions, notamment politiques, visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre) et le coût des dommages. Selon les premières simulations de ce modèle, la trajectoire de décarbonation mondiale optimale conduisait en 2100 à dépasser les 3 °C de réchauffement par rapport à l'ère préindustrielle.

Elle aurait été associée à un prix du carbone atteignant 20 \$/tCO₂, une baisse des émissions mondiales de 15 %, mais surtout des impacts macroéconomiques quasiment négligeables. Au vu de la multiplication des épisodes climatiques intenses dans le monde depuis plusieurs années, de tels résultats apparaissent aujourd'hui peu réalistes.

Bien que très controversé (Pindyck, 2017 ; Dietz *et al.*, 2020), ce travail original a posé de nombreuses bases pour la recherche académique. C'est la première fois qu'un modèle associait des modèles macroéconomiques traditionnels avec une représentation du climat (bien que très simplifiée). Le modèle relie la production économique à des émissions de gaz à effet de serre, puis introduit les notions de dynamique climatique (liens entre émissions et concentrations atmosphérique et sous-marine), de sensibilité climatique (lien entre concentrations, forçage radiatif¹ et température) et de dommages climatiques (lien entre température et pertes économiques), ce qui permet de postuler une boucle de rétroaction directe entre macroéconomie et climat.

Cette approche, dite « *top-down* », s'appuie notamment sur une « fonction de dommages » macroéconomique. Définies pour la première fois par Nordhaus, les fonctions de dommages sont des fonctions mathématiques reliant les évolutions de la température à une perte de Produit Intérieur Brut (PIB) agrégée au niveau mondial (encadré 1).

La calibration de cette fonction a occupé les travaux académiques de Nordhaus (2016) mais aussi de la communauté de chercheurs (Howard &

1. 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 – Forme(s) d'une fonction de dommages

Dans l'approche « *top-down* » initiée par Nordhaus (1992), une fonction de dommages prend généralement la forme d'une fonction polynomiale $f(T)$. Celle-ci ampute l'activité nationale (ou mondiale selon le champ géographique) $Y_{théorique}$, c'est-à-dire l'activité qui adviendrait en l'absence de changement climatique d'une fraction dépendant de T , l'évolution de la température depuis l'ère préindustrielle, et aboutit à l'activité réelle $Y_{réel}$:

$$Y_{réel} = (1 - f(T)) \times Y_{théorique}$$

avec : $f(T) = aT + bT^2$ (a et b étant des paramètres estimés ou calibrés) et $0 \leq f(T) \leq 1$.

Dans l'approche « *bottom-up* » initiée par la modélisation multisectorielle, les fonctions de dommages (dites « sectorielles ») s'appliquent au niveau d'un ou plusieurs secteur(s) et n'affectent plus directement le niveau d'activité globale, mais certains paramètres qui conditionnent les comportements d'offre et de demande : niveau de la productivité, taux de dépréciation du capital, demande de certains biens et services, etc.

Sterner, 2017). Si les premières estimations dites « énumératives » (qui regroupent et calibrent des impacts à partir de sources plus ou moins précises) ont conduit à des résultats très incertains, les fonctions suivantes se sont basées sur des méthodes plus élaborées, notamment l'économétrie ou la simulation des dommages dans des modèles d'équilibre général calculable. Toutefois, ces travaux ont conduit à des fourchettes d'impacts extrêmement hétérogènes, à la fois du fait de la diversité des approches, mais aussi des différents champs de dommages retenus (Howard & Sterner, 2017). C'est parmi ces approches que le NGFS (*Network for Greening the Financial System*, réseau des banques centrales pour le verdissement du système financier) a retenu les dommages macroéconomiques dans ses premiers scénarios de référence (NGFS, 2020) : deux fonctions de dommages issues des méta-analyses de Nordhaus & Moffat (2017) et de Howard & Sterner (2017) ; une issue de Kalkuhl & Wenz (2020) à partir de l'économétrie de panel. Là aussi, l'hétérogénéité prévaut : pour un scénario de réchauffement de +3,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle, ces fonctions indiquent respectivement 3 points, 10 points et 15 points de PIB de dommages en 2100 au niveau mondial.

Une seconde méthodologie, dite « *bottom-up* », a progressivement émergé à partir des années 2000. Cette approche représente 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 considérant les dommages du changement climatique non plus comme un risque global, mais comme un ensemble d'événements spécifiques qui se matérialisent sur des acteurs ou des secteurs distincts, à la fois du côté de l'offre et de la demande. Les dommages sont alors traduits à travers des chocs macroéconomiques exogènes, à savoir notamment : la productivité des facteurs de production, les taux de dépréciation du capital, mais aussi les comportements de demande en énergies et en services de tourisme.

À cette fin, les chercheurs ont mobilisé des modèles multisectoriels, adaptés pour distinguer les chocs advenant secteur par secteur. En 2006, une des premières évaluations s'est reposée sur le modèle statique GTAP-EF et a évalué les effets macroéconomiques de long terme du scénario du GIEC « B1 » sur des conséquences du changement climatique très ciblées : les flux touristiques et l'élévation du niveau de la mer. Si les effets macroéconomiques estimés restent limités, des études ont mis en évidence des

effets d'interaction liés à la survenue simultanée de plusieurs événements et conclu sur la nécessité d'évaluer le coût des dommages dans une approche d'équilibre général pour ne pas se limiter aux seuls coûts directs (Bigano *et al.*, 2006). Plus tard, Eboli *et al.* (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 du réchauffement qui ont été estimés dans les études précitées restent encore très faibles, voire même positifs pour certains pays européens. En effet, certains d'entre eux profitent de la hausse des flux touristiques, mais aussi du fait que certains dommages pénalisent davantage les économies étrangères et améliorent leur compétitivité-prix à l'export (c'est notamment le cas des chutes de rendements agricoles).

La Commission européenne a également retenu une approche similaire dans son modèle GEM-E3, en estimant les dommages pour l'ensemble des pays de l'Union à partir d'une méthodologie harmonisée et d'une base large de données climatiques et économiques. Ses résultats tendaient encore à sous-estimer le coût du changement climatique (1,1 point de perte de PIB essentiellement liée à la productivité au travail, au niveau de la mer et aux rendements agricoles). La principale difficulté, 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 *et al.*, 2014).

Il apparaît toutefois aux chercheurs que l'approche de la modélisation « *bottom-up* » (dont les principaux résultats pour l'Europe sont présentés dans l'annexe) permet de retracer précisément et dans le temps la manière dont les effets du changement climatique impacteraient l'économie, tout en prenant en compte des effets de rétroaction et des effets de second-tour, comme l'évolution des prix relatifs (Roson & Sartori, 2016). Enfin, avec les nouvelles contraintes pesant sur les acteurs économiques et financiers, certaines institutions financières ont poursuivi ces travaux pour anticiper les risques pesant sur leur activité. L'agence de notation Moody's a par exemple intégré le coût des dommages dans son propre modèle macroéconomique, mais elle sous-estime également les coûts du changement climatique dans les pays du Nord,

qui bénéficieraient de baisses de productivité plus limitées que dans le reste du monde, d'une hausse des flux touristiques et d'une baisse des prix du pétrole (Lafakis *et al.*, 2019).

Après avoir pris en compte les contraintes d'offre dans le modèle « Three-Me » (section 1), des fonctions de dommages « *bottom-up* » sont estimées à partir des données recensées dans la littérature (section 2). Une fois ces fonctions associées au modèle (section 3) et le coût agrégé des dommages estimé (section 4), les conséquences macroéconomiques d'un scénario d'inaction sont évaluées au regard de celles d'une transition ordonnée (section 5).

1. Modification du modèle macroéconomique « Three-Me »

Le modèle « Three-ME » (Modèle Macroéconomique Multisectoriel pour l'Évaluation des politiques Énergétiques et Environnementales²) est l'outil mobilisé par l'ADEME pour évaluer le coût des dommages. Il s'agit d'un modèle d'équilibre général calculable d'inspiration keynésienne (Reynès *et al.*, 2021). Contrairement aux modèles dits « walrassiens », 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 macroéconomiques et la possibilité d'effets multiplicateurs keynésiens. 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 compte 33 secteurs productifs (produisant 28 commodités). Le modèle s'appuie notamment sur les données de la comptabilité nationale française et agrège les secteurs en fonction des nomenclatures existantes, en distinguant spécifiquement 13 secteurs énergétiques et quatre facteurs de production : du travail, du capital, des biens intermédiaires et de l'énergie. La fonction de production « CES généralisée » permet aux entreprises de minimiser leurs coûts en arbitrant entre ces facteurs, mais aussi entre les différentes énergies utilisées et entre les produits domestiques et importés. Enfin, le modèle calcule les besoins en énergie à travers une représentation fine du stock de capital des ménages, qui évoluent en fonction des besoins de transport et de chauffage et des performances énergétiques du parc immobilier et automobile.

Le modèle a été mobilisé pour de nombreux exercices prospectifs. Le Ministère de la transition écologique s'en est servi pour réaliser les scénarios macroéconomiques de la Stratégie nationale bas-carbone (Callonnec & Cancé, 2022). Comme le modèle Mésange (Bardaji *et al.*, 2017), il permet également de mesurer l'impact macroéconomique des politiques fiscales et budgétaires (Callonnec *et al.*, 2016) ou d'évaluer l'impact de mesures climatiques spécifiques, comme des hypothèses d'évolution du mix électrique français (ADEME, 2016). Plus récemment, le modèle a contribué à estimer les effets macroéconomiques d'un scénario de transition retardée (Boitier *et al.*, 2023).

Les nouvelles réglementations financières et économiques (taxonomie, reporting extrafinancier, nouvelles exigences des superviseurs) et les nouveaux besoins institutionnels en scénarios climatiques, en particulier dans le secteur financier (TCFD, 2017 ; NGFS, 2021 ; ECB, 2022) encouragent les développements de la modélisation macroéconomique pour étendre les applications des scénarios climatiques et mesurer au mieux l'ensemble des « risques climatiques » pouvant se matérialiser pendant la période de transition (Carney, 2015). Ces scénarios incluent les risques de transition, définis comme les conséquences potentiellement adverses de la décarbonation de l'économie (Boitier *et al.*, 2023), mais n'incluent en général pas les risques physiques, dont l'évaluation reste soumise à trop d'incertitudes et reste encore marquée par l'application des fonctions de dommages agrégées au niveau mondial (NGFS, 2021). L'article propose une application de fonctions « *bottom-up* », selon la littérature mentionnée en introduction, associée à une modification en amont de la structure théorique du modèle pour évaluer le coût des dommages en France.

Plusieurs modifications significatives ont été apportées au modèle. À l'origine, celui-ci s'appuie sur un cadre « néokeynésien » 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 ajustement de l'offre (productions et importations) à la demande agrégée : c'est l'équilibre « ressources-emplois », qui permet alors de reconstituer les principaux agrégats de la comptabilité nationale. Ce cadre théorique est similaire à celui du modèle Mésange, codéveloppé par l'Insee et le Trésor (Bardaji *et al.*, 2017), mais n'est pas adapté à l'évaluation

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

des dommages du changement climatique car il présente les faiblesses théoriques suivantes :

- les contraintes physiques sur la production : dans la version originale de Three-ME, 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, etc.). Contrairement aux modèles d'équilibre général néoclassiques, où les quantités produites dépendent de la disponibilité des facteurs de production, les modèles néokeynésiens prennent mal en compte les effets récessifs qui pourraient résulter d'une contraction de la quantité de facteurs de production disponibles. 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 Three-ME, l'inflation est principalement 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 »).

L'hypothèse selon laquelle l'offre s'ajuste à la demande dans un 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 aux 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 et satisfaire la demande. L'augmentation de l'investissement et de l'emploi peuvent avoir des effets d'entraînement positifs sur l'activité, susceptibles de contrebalancer au moins en partie les effets récessifs directs du choc d'offre.

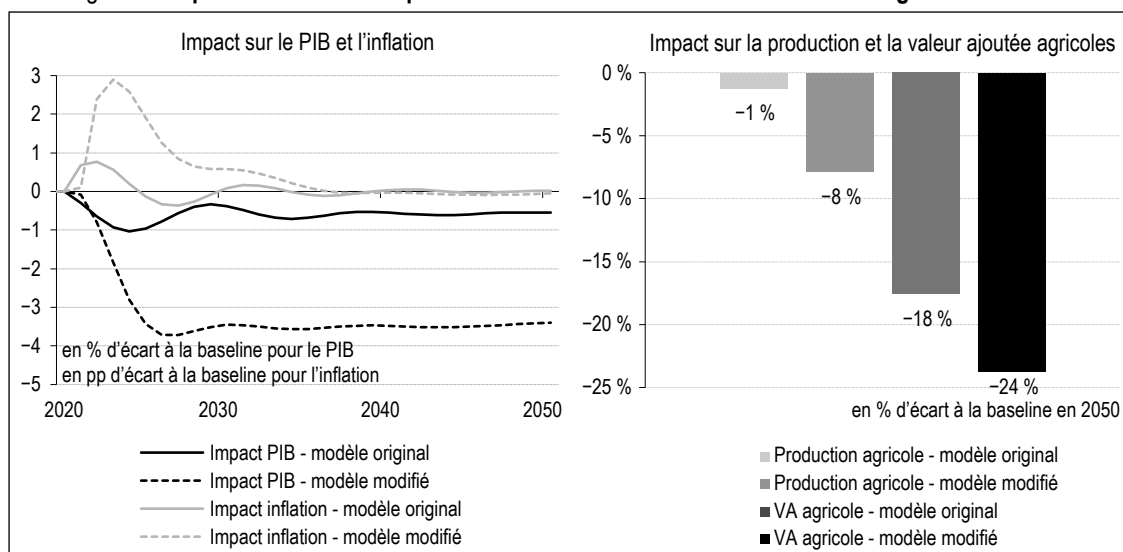
Ce dernier effet est peu pertinent dans le secteur agricole (espaces cultivables limités) et de l'électricité (durée d'installation de nouvelles capacités et dépendance à certains facteurs climatiques). Il serait illusoire de penser qu'un surcroît d'investissement ou d'embauche puisse permettre de maintenir le niveau de production antérieur.

Comme le montrent les simulations (figure I), le cadre traditionnel d'offre-demande agrégées (« 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 parce que 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 justifiée (cf. encadré 1), 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.

Pour remédier à ces limites, le niveau des productions agricole et énergétique a été contraint. Ce n'est plus l'offre qui s'ajuste à la demande dans le cadre de prix relativement rigides à court terme, mais la demande qui s'ajuste à l'offre via une plus grande flexibilité des prix (encadré 2). En cas de réduction de la production domestique, les importations augmentent pour satisfaire au moins en partie la demande de court terme qui ne peut plus être satisfaite par les producteurs nationaux. Cela limite la hausse du prix de marché et la baisse de la consommation. Sachant que ces produits sont considérés comme de première nécessité, la demande est assez peu élastique. Elle diminue cependant sous l'effet de la hausse des prix. En supposant une forte contraction de la production agricole mondiale, on pourrait se retrouver dans le cas de figure où la consommation alimentaire par tête ne serait pas suffisante pour éviter la malnutrition d'une partie de la population. Il faudrait alors prendre en compte l'impact de la pénurie sur la croissance démographique³ et la productivité du travail. Cette ultime boucle de rétroaction n'a pas encore été introduite dans le modèle.

3. Dans Three-Me, la croissance démographique est exogène, définie en prenant celle qu'estime l'Insee. Elle est de l'ordre de 0,4 % par an. Une pénurie alimentaire pourrait affecter le taux de mortalité à la hausse et le taux de natalité à la baisse.

Figure I – Impact macroéconomique d'une baisse instantanée des rendements agricoles de 10 %



Lecture : dans le modèle Three-ME « original » (resp. modifié), une baisse des rendements agricoles de 10 % conduit à une baisse de la production agricole de 1 % (resp. 8 %) à long terme (en 2050).

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

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 (figures I et II). 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, l'ajustement étant plus rapide, passant totalement par les prix (et non plus par les volumes). 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. Au final, la baisse d'activité est beaucoup plus importante dans la version modifiée. Comme le notent aussi Reilly *et al.* (2012), les effets macroéconomiques sont plus larges que les seuls effets sur la production agricole, car la consommation est très inélastique et nécessite que les facteurs de production soient en partie réaffectés au secteur agricole pour assurer en priorité la demande alimentaire au détriment de la production des autres secteurs.

2. Estimation d'une fonction de dommages en France

En reprenant une approche « *bottom-up* », les économistes de l'ADEME ont recensé

géographiquement et sectoriellement les coûts des dommages marchands en France à travers une revue de littérature approfondie, en excluant à ce stade les dommages non marchands (impact sur la biodiversité), les effets indirects du changement climatique (comme les déplacements de population) et les coûts d'adaptation et de reconstruction. Les impacts monétaires sous-jacents à différents scénarios de réchauffement sont extrapolés et les fonctions de dommages sectorielles sont calibrées selon des régressions traditionnelles. Quant à l'évaluation des risques aigus, malgré leur imprédictibilité, ceux-ci sont extrapolés à partir des recensements historiques des catastrophes naturelles issus de la base EM-DAT (voir infra). Nous retenons ici une approche par risque et non par conséquence : il ressort néanmoins que les bâtiments et leurs occupants sont exposés à une multiplicité de risques, comme l'indiquent les études prospectives de l'ADEME (ADEME, 2022).

Les principales fonctions contribuant aux impacts sont précisées dans le tableau 1. À notre connaissance, ce recensement prend en compte la plupart des risques recensés dans les classifications internationales (comme celle de la taxonomie européenne) et distingue les risques chroniques des risques aigus. Seule l'évaluation des risques aigus reste parcellaire. Par exemple, les feux de forêt, en théorie inclus dans l'historique des catastrophes naturelles, sont partiellement répertoriés et leur coût moyen (quelques millions d'euros) est

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 » :

$$Y_i + M_i = D_i$$

$$P_{Y_i} = \mu CU_i = \mu (\alpha_{L_i} c_{L_i} + \alpha_{K_i} c_{K_i} + \alpha_{E_i} c_{E_i} + \alpha_{mat_i} c_{mat_i}),$$

avec $\alpha_{f,j}$: rémunération nominale du facteur f dans le secteur i et $c_{f,j}$: 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 :

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

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 :

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

PM_i autrefois supposé exogène devient $\dot{PM}_i = \dot{PM}_{eq_i}$.

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

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

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 $(\dot{P}_{ij} - \dot{P}_i)$ augmentent :

$$\dot{CI}_{ij} = \dot{Y}_j - \gamma (\dot{P}_{ij} - \dot{P}_i).$$

Les imports M augmentent comme la demande D et décroissent lorsque leurs prix P_m augmentent plus vite que les prix domestiques $\dot{P}_i$:

$$\dot{M}_i = \dot{D}_i + \gamma' (\dot{P}_i - \dot{P}_m).$$

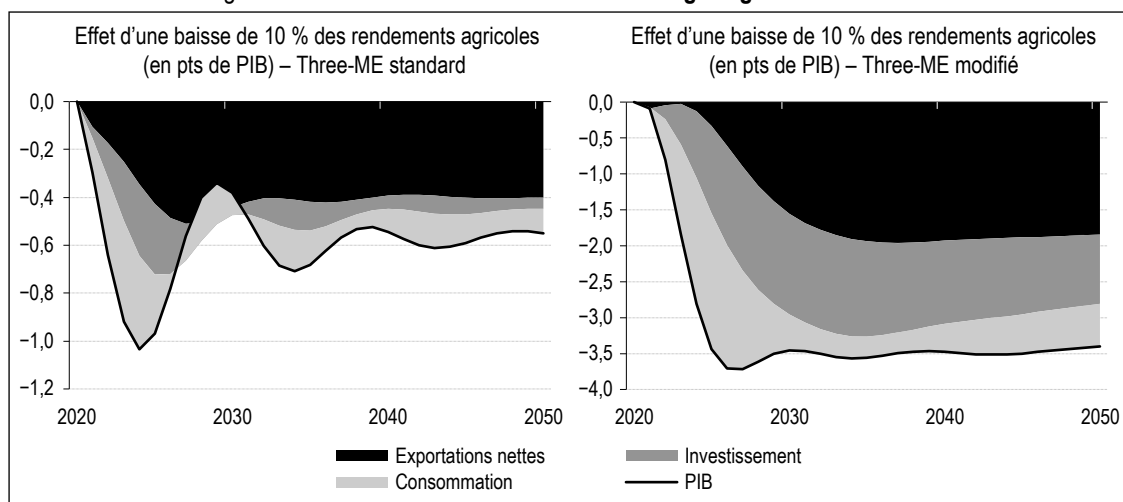
Ainsi, la demande s'ajuste au niveau de l'offre potentielle via l'augmentation des prix de marché. Cette spécification permet de simuler une baisse effective des rendements et de la production domestique agricole, sans hausse de l'investissement et de l'emploi sectoriels, et une hausse des prix de marché 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.

vraisemblablement sous-estimé⁴, d'autant plus que les dégâts non-marchands ne sont pas inclus dans l'évaluation (l'adaptation aux feux de forêt reviendrait en France à plusieurs milliards d'euros par an). D'autres impacts liés aux catastrophes naturelles ont également été investigués, sans pouvoir retenir des estimations suffisamment poussées pour les intégrer aux dommages, comme les risques montagneux et glissements de terrain ; en théorie, si l'ensemble des risques aigus est pris en compte dans les recensements

des catastrophes naturelles, la base historique traduit essentiellement les impacts monétaires de certaines catégories (inondations, ouragans, sécheresse, épisode de température extrême). Elle ne permet d'ailleurs pas de modéliser la hausse future de la gravité de ces événements.

4. L'ONERC (2009) estime que l'impact du changement climatique serait légèrement positif sur la production de bois jusqu'en 2050, mais s'inverserait à horizon 2100 du fait des événements extrêmes et de l'extension de la forêt méditerranéenne.

Figure II – Effet de la modélisation des dommages agricoles sur le PIB



Lecture : dans la version modifiée de « Three-ME », une baisse instantanée de 10 % des rendements agricoles diminue le PIB de 3,5 points à long terme (dont 2 points liés aux exports), contre 0,6 point (dont 0,4 point lié aux exports) dans la version standard, dans laquelle les prix sont relativement rigides à court terme et évoluent comme les coûts de production.
Source : modèle Three-ME, selon le modèle standard (branche agricole d'équilibre offre-demande par les volumes) ou la version modifiée (équilibre par les prix).

Enfin, les effets de l'augmentation des flux migratoires ne sont pas modélisés⁵.

2.1. Risques chroniques

2.1.1. 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 extérieur

(agriculture, construction) et en particulier dans les pays du sud de l'Europe (Gosling *et al.*, 2018). En l'absence d'adaptation et selon les modélisations d'impact les plus défavorables, la productivité du travail en extérieur pourrait diminuer de 4 points d'ici la fin du siècle en cas

5. Selon Missirian & Schlenker (2017), d'ici la fin du siècle, le nombre de demande d'asiles augmenterait de 188 % (66 000 demandes additionnelles par an) dans le scénario RCP 8.5.

Tableau 1 – 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	Logement des ménages
Demande énergétique des services	Demande énergétique des entreprises	Toute l'économie
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
Productivité du travail en extérieur	Productivité du travail	Agriculture, Foresterie, Construction
Productivité du travail en intérieur	Productivité du travail	Toute économie (hors extérieur)
Rendements agricoles et sylvicoles	Productivité des facteurs de production	Agriculture, Foresterie
Rendements éoliens	Productivité des facteurs de production	Électricité - éolien
Rendements photovoltaïques	Productivité des facteurs de production	Électricité - solaire
Retrait-gonflement des argiles	Taux de dépréciation	Immobilier résidentiel et tertiaire
Revenus du tourisme	Demande mondiale	Services privés

Lecture : parmi les risques physiques recensés, l'élévation du niveau de la mer est supposée influencer, au niveau macroéconomique, les taux de dépréciation du capital dans le secteur de l'immobilier résidentiel et tertiaire.
Source : Jacquetin (2021).

de réchauffement élevé (2 points pour le travail en intérieur) (figure III).

2.1.2. Rendements agricoles

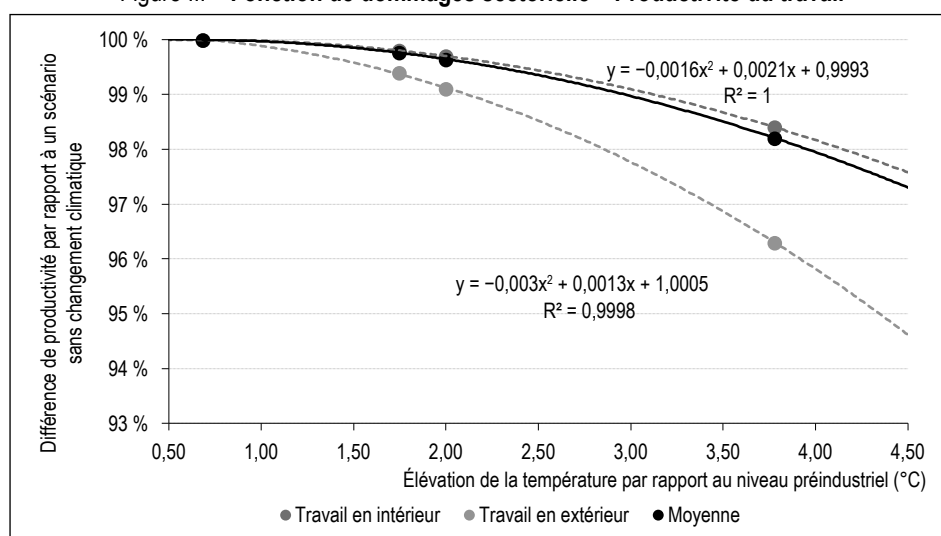
À partir de plusieurs approches de simulation et de projection, il est retenu que les rendements des cultures de blé et de maïs sont supposés diminuer significativement face à l'élévation de la température, hors prise en compte des effets des précipitations (Zhao *et al.*, 2017). Seuls les effets sur 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 de 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 IV).

2.1.3. Niveau de la mer

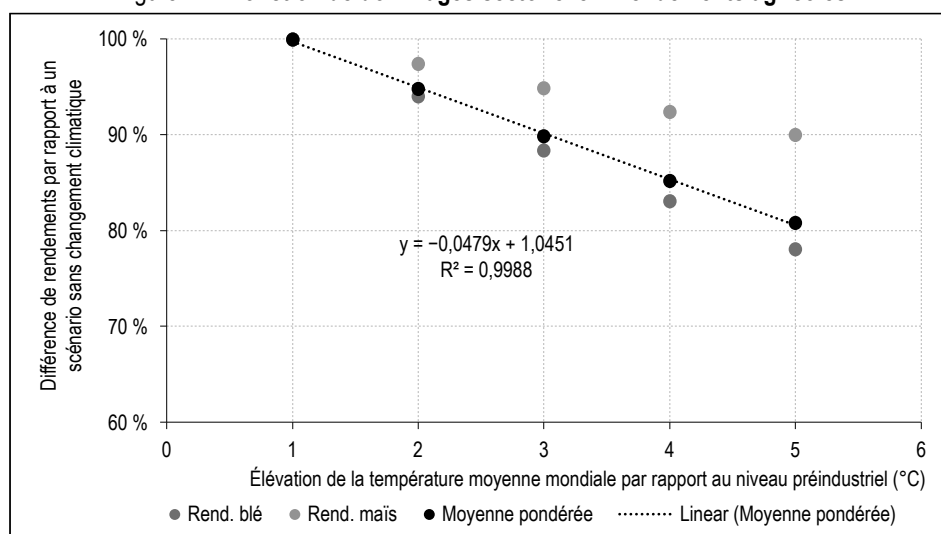
Les projections de la Commission européenne sur l'impact du niveau de la mer et de ses dégâts le long des côtes (effets des marées, vagues et ondes de tempête, inondations par submersion marine) indiquent que la France serait un des pays européens les plus touchés économiquement par la montée des eaux (Voudoukas *et al.*, 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 (figure V).

Figure III – Fonction de dommages sectorielle – Productivité du travail



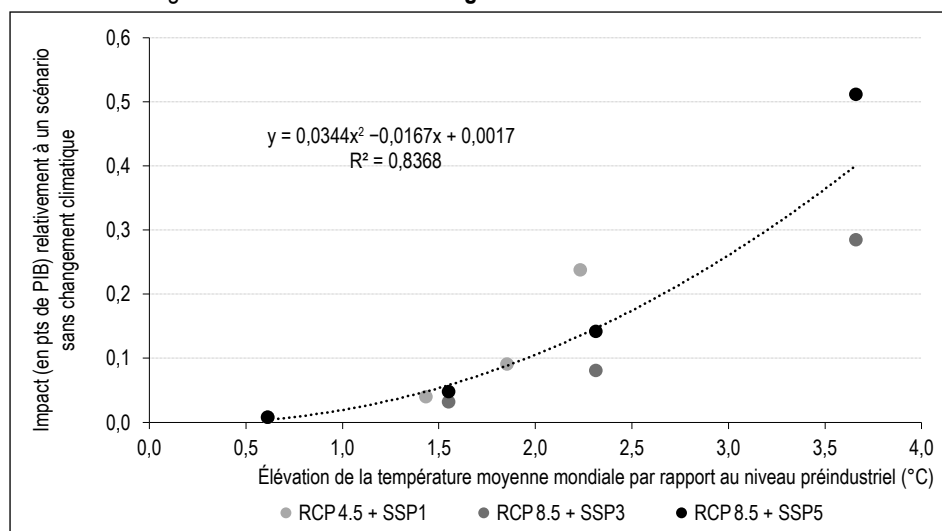
Source : ADEME à partir de Gosling *et al.* (2018).

Figure IV – Fonction de dommages sectorielle – Rendements agricoles



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

Figure V – Fonction de dommages sectorielle – Niveau de la mer



Source : ADEME à partir de Vousdoukas *et al.* (2019).

2.1.4. Évolution des besoins de chauffage et de climatisation

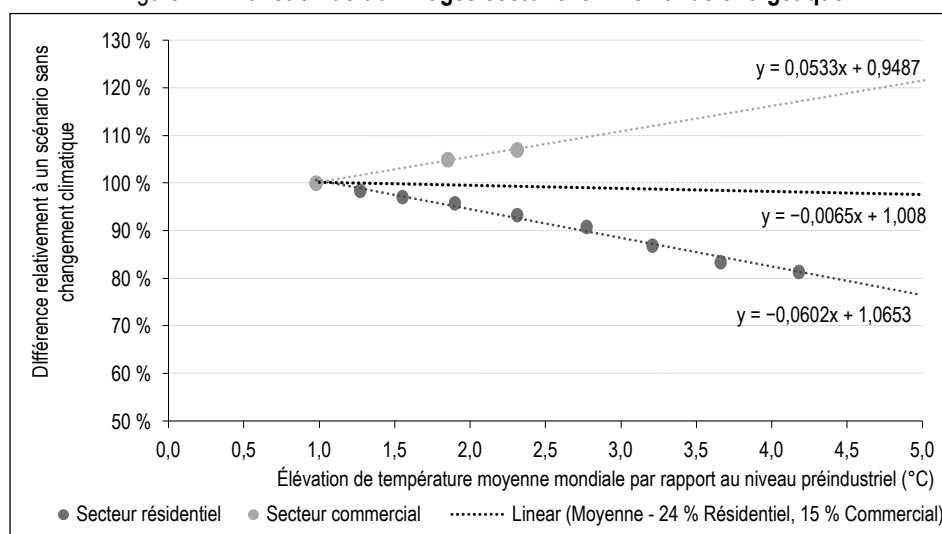
L'évolution de la température aura une incidence majeure sur les besoins de climatisation et de chauffage du secteur résidentiel et du secteur tertiaire. Kitous & Després (2018) estiment l'impact de l'évolution de la température sur la demande résidentielle en climatisation et en chauffage par rapport à un scénario où la température n'augmente pas après 2010. De Ciang & Sue Wing (2019) estiment les impacts de l'évolution de la température sur les autres secteurs. Ces impacts apparaissent négligeables en France, sauf celui 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 VI).

2.1.5. Production électrique

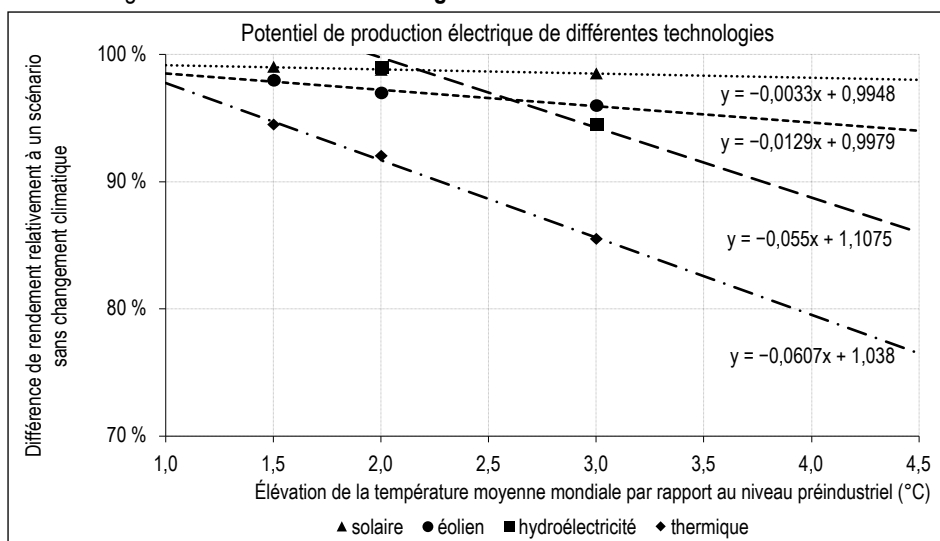
Pour quatre technologies de production d'électricité (solaire, éolien, hydroélectrique, thermique), une fonction traduisant l'évolution des rendements par rapport à la période 1971-2000 est estimée à l'aide de Tobin *et al.* (2018). Les impacts sont plus limités pour la production solaire et éolienne,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

Figure VI – Fonction de dommages sectorielle – Demande énergétique



Source : ADEME à partir de Kitous & Després (2018) et de Ciang & Sue Wing (2017).

Figure VII – Fonction de dommages sectorielle – Production d'électricité



Source : ADEME à partir de Tobin *et al.* (2018).

2.1.6. 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 VIII).

2.1.7. Retrait-gonflement des argiles

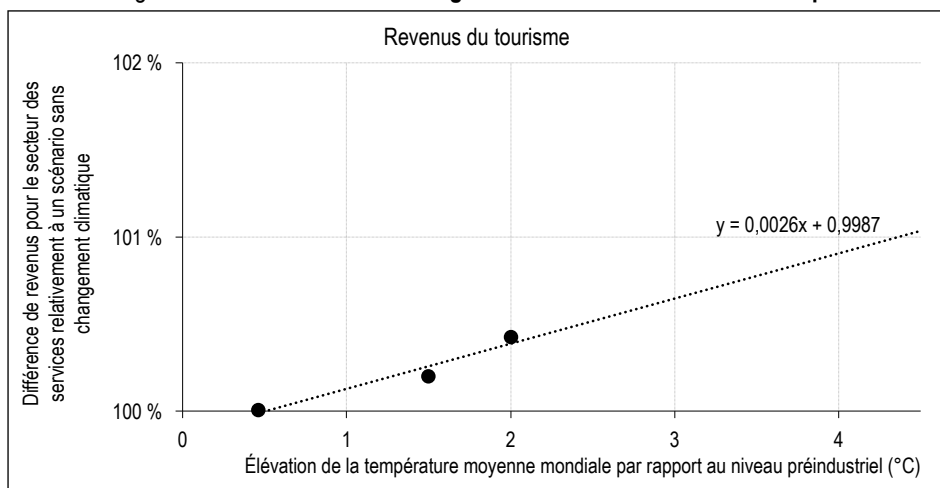
Les estimations sur les dommages liés au retrait et gonflement des argiles sont extraites de Gourdiér & Plat (2018). La hausse du coût des dommages dépend d'abord de l'augmentation

du nombre de maisons individuelles en zone à risque, puis de l'augmentation de l'ampleur et de la fréquence des sécheresses (figure IX).

2.1.8. Productivité du travail et hausse des maladies

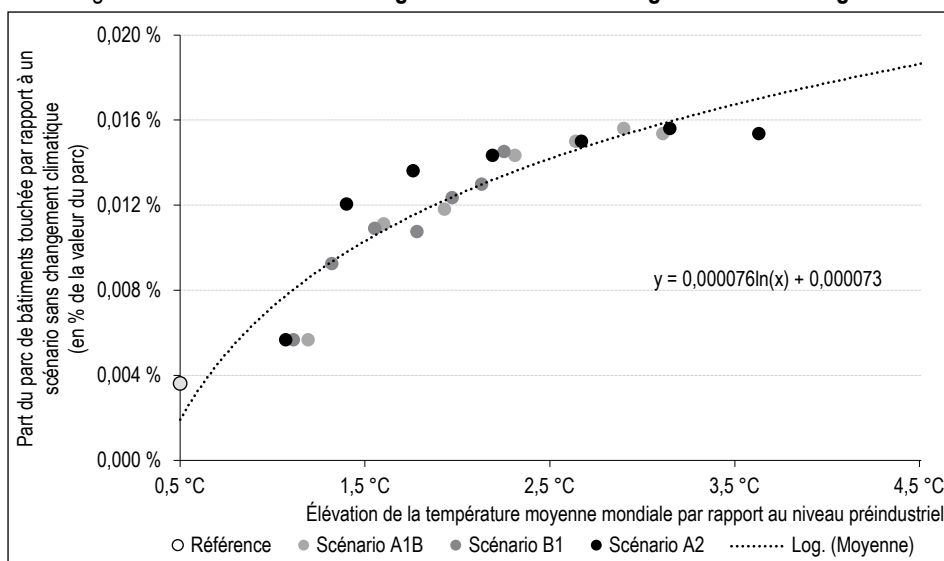
Paci (2014) évalue l'impact de l'élévation de la température sur la productivité au travail en Europe (en nombre de jours de travail perdus par habitant) en évaluant la relation entre hausse de température et nombre de jours de travail perdus via plusieurs phénomènes : l'augmentation de la morbidité et mortalité liée à la température (recrudescence de maladies cardio-vasculaires et respiratoires), le stress thermique additionnel lié aux vagues de chaleur (mortalité et morbidité) ainsi que le regain d'infections alimentaires et hydriques (salmonellose et campylobactériose).

Figure VIII – Fonction de dommages sectorielle – Demande touristique



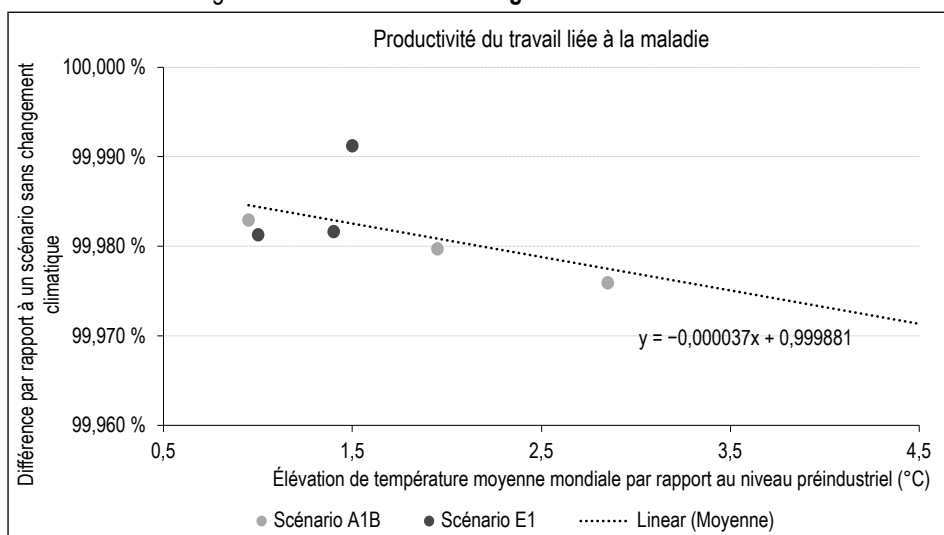
Source : ADEME à partir de Jacob *et al.* (2018) et Spandre *et al.* (2019).

Figure IX – Fonction de dommages sectorielle – Retrait-gonflement des argiles



Source : ADEME à partir de Gourdiér & Plat (2018).

Figure X – Fonction de dommages sectorielle – Maladie



Source : ADEME à partir de Paci (2014).

On fait l'hypothèse que la valeur estimée par habitant pour l'Europe est applicable à la France (figure X).

2.2. Risques aigus

2.2.1. Coûts directs en France

La base de données internationales sur les situations d'urgence (EM-DAT pour *Emergency Events Database*) recense des informations sur les catastrophes naturelles et leurs coûts économiques (coûts des dommages, coûts assuranciers, coûts de reconstruction). Gérée par le Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes (CRED, 2021) en Belgique, elle est ouverte pour la recherche académique

et fait partie des plus grosses bases de données sur les risques extrêmes au monde. Néanmoins, elle affiche les informations de manière hétérogène et reste soumise à des lacunes importantes (couverture temporelle et spatiale, indicateurs et estimations manquantes pour certaines catégories d'événements, etc.).

Les inondations et les ouragans pèsent le plus sur le coût global des événements extrêmes en France (en moyenne, 1 Md\$ par ouragan 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\$.

Les données à disposition permettent d'évaluer une tendance à la hausse du nombre de catastrophes naturelles enregistrées et recensées dans la base en fonction de l'évolution de la température (figure XI). En imputant le coût moyen observé pour ces événements (près de 1 Md€, figure XII), il est possible de partiellement relier la hausse des températures depuis l'ère préindustrielle à la hausse de la fréquence des risques physiques extrêmes.

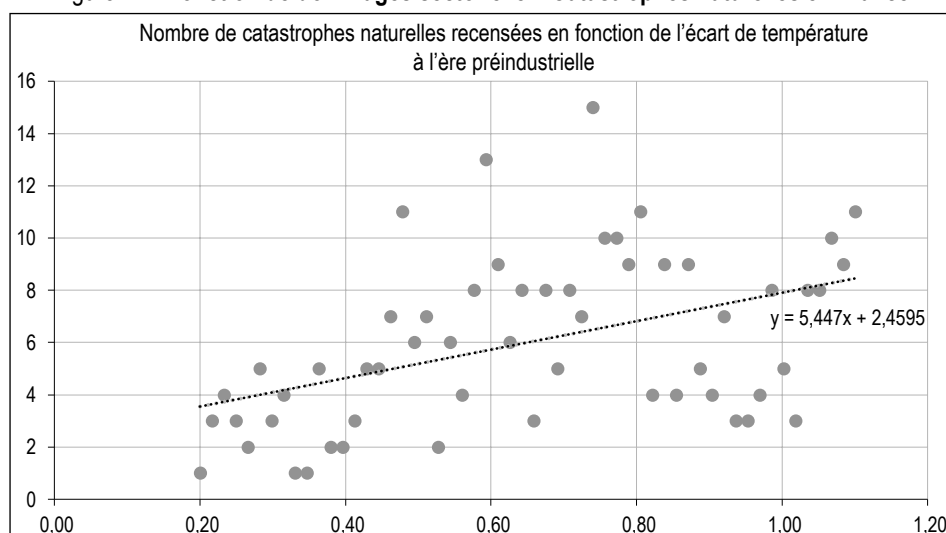
Ce modèle reste très parcellaire, car il ne tient pas compte de la hausse potentielle de la sévérité

des événements dans le futur, et n'étudie pas la prédominance de nouvelles catégories d'événements 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 dans un scénario d'inaction) et ne représentent que la moyenne du coût observé sur longue période.

2.2.2. Risques aigus dans le reste du monde

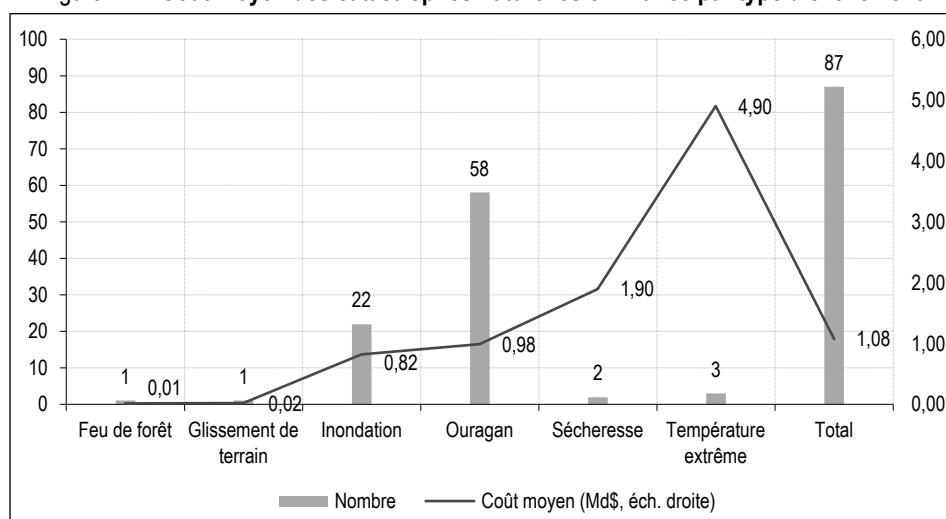
Les risques climatiques altéreront les économies étrangères et pèseront sur leur demande interne (donc sur la demande adressée à la France) et leurs prix (donc sur l'inflation importée en France et la compétitivité-prix relative). Enfin, les dommages pourront aussi influencer l'environnement financier (prix des matières

Figure XI – Fonction de dommages sectorielle – Catastrophes naturelles en France



Source : EM-DAT (calculs des auteurs).

Figure XII – Coût moyen des catastrophes naturelles en France par type d'événement



Source : EM-DAT (calculs des auteurs).

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 le modèle est centré sur l'Europe (Ciscar Martinez *et al.*, 2014). Certaines études en économie ouverte ont toutefois pu spécifiquement évaluer l'évolution future des flux commerciaux régionaux liés au changement climatique. 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 *et al.*, 2017). Au contraire, d'autres études évaluent des effets potentiellement massifs sur le commerce des pays 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 reliant le niveau des exportations françaises à des indicateurs de catastrophes naturelles (Schleypen *et al.*, 2019). Selon cette modélisation, l'impact des événements extrêmes sur la chaîne logistique représenterait une contribution majeure au coût des dommages climatiques en France. Ils correspondraient aux conséquences économiques estimées des ruptures des chaînes logistiques françaises provoquées par des catastrophes naturelles à l'étranger et à la baisse de la demande externe par suite des dommages climatiques (figure XIII). 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 françaises lorsque leurs clients sont touchés par des catastrophes naturelles.

Outre du fait de la clarté et la rigueur de leurs méthodologies, les études mobilisées ont également été sélectionnées du fait qu'elles évaluent l'impact du risque à travers un indicateur économique mobilisable dans un modèle macroéconomique et projettent l'évolution de cet indicateur dans différents scénarios d'élévation de température. Il convient toutefois de rappeler que les études d'impacts du changement climatique peuvent aboutir à des résultats très hétérogènes. Bien qu'il soit difficile de réconcilier des résultats sur des champs très variés, le tableau 2 propose une comparaison de nos résultats (couvrant dix fonctions de dommages) avec d'autres estimations récentes de la littérature, dont la plupart sont recensées par Delahais & Robinet (2023). France Assureurs (2021) chiffrait notamment le coût en 2050 des risques liés à la sécheresse, aux inondations, aux submersions marines et aux tempêtes, et l'ONERC⁶ (2009) projetait les coûts associés au tourisme, au RGA, aux submersions marines et à la production électrique.

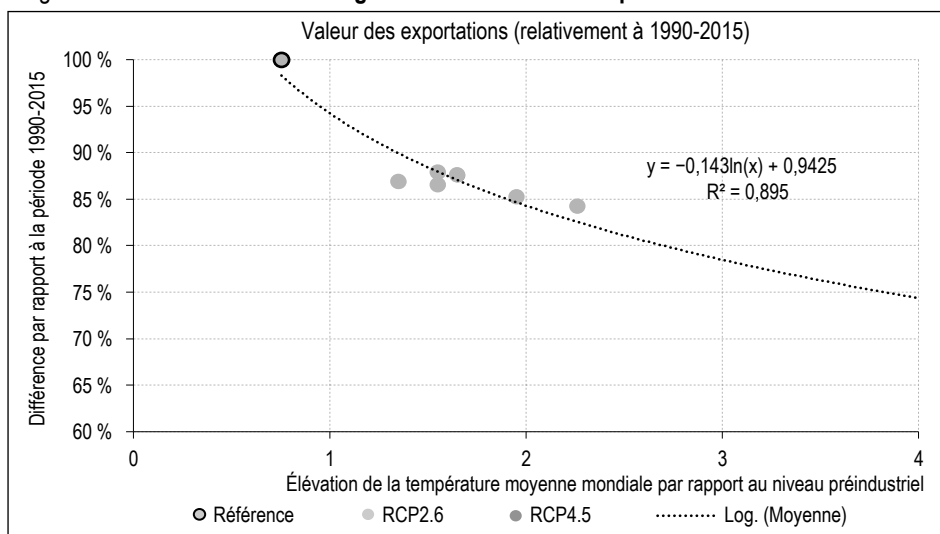
3. Modélisation macroéconomique

3.1. Les rendements agricoles et électriques / la productivité du travail

La diminution des rendements agricoles et sylvicoles (cf. figure IV) et des productions électriques (cf. figure VII) est modélisée comme

6. Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique.

Figure XIII – Fonction de dommages sectorielle – Catastrophes naturelles dans le monde



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

Tableau 2 – Comparaison des dix fonctions de dommages avec d'autres évaluations

Risques physiques	Hypothèses des auteurs (+3,5 °C)	Impacts comparatifs	Référence
Productivité du travail	-2 points de productivité	+0,96 point de PIB annuel perdu en 2045-2055 +1,14 point en 2060-2070	France Stratégie (2023) RCP 8.5 - 2050
Rendements agricoles	-12 % de rendements globaux	-6,5 points de rendements des prairies -3,2 points de rendements du blé tendre d'hiver -4,2 points de l'orge d'hiver	France Assureurs (2021) RCP 8.5 - 2050
Submersion marine	-0,3 point de PIB (niveau de la mer)	+6,5 Md€ en 2020-2050 soit 200 M€ par an 15 à 35 Md€ en Languedoc-Roussillon soit 200 à 400 M€ par an	France Assureurs (2021) RCP 8.5 - 2050 ONERC (2009) - 4 °C
Demande d'énergie	-2 % de demande d'énergie	-8TWh de demande d'énergie de chauffage en 2050 +8TWh de demande d'énergie de climatisation	RTE (2022) RCP 8.5 - 2050
Production d'électricité	<u>En France</u> Hydroélectricité : -5 % Éolien : -5 % Thermique (dont nucléaire) : -20 % Solaire : -2 %	<u>En Europe</u> Hydroélectricité : +3 % Éolien : -0,2 % Nucléaire : -2 % Thermique : +0,2 % Solaire : stable <u>En France</u> : Hydroélectricité : -15 %	Tobin <i>et al.</i> (2018) RCP 8.5 - 2050 ONERC (2009) - 2050
Tourisme (ski)	-11 % de revenus liés au ski (+2 °C)	20 stations opérables dans les Alpes (sur 143) 55 stations opérables dans les Alpes	WWF France (2021) / +4 °C ONERC (2009) / +4 °C
Santé	<u>En Europe</u> 7,6 millions de jours de travail perdus par an (2085)	<u>En Europe</u> +60 000 décès par an +15 000 victimes de maladies respiratoires	IPCC (2023) +3 °C
Retrait-gonflement des argiles	0,016 % du parc	+17,2 Md€ soit 500 M€ par an +1,3 Md€ par an	France Assureurs (2021) RCP 8.5 - 2050 ONERC (2021) / +4 °C
Inondations fluviales	-0,15 point de PIB (catastrophes naturelles domestiques)	+3,1 Md€ par an soit 100 M€ par an	France Assureurs (2021) RCP 8.5 - 2050
Demande mondiale	Adressée à la France : -20 %	Adressée à l'UE : stable	Dellink <i>et al.</i> (2017) RCP 8.5 - 2060

Note : les estimations sont présentées à des années précises (ex. : 2050) ou pour un niveau de réchauffement donné (ex. : +4 °C). Les effets des inondations (France Assureurs) sont comparés au coût des catastrophes naturelles domestiques, tandis que ceux des submersions marines (France Assureurs) sont comparés au coût de l'élévation du niveau de la mer. Le scénario RCP 8.5 (*Representative Concentration Pathway* 8.5) est un scénario d'évolution de la concentration de GES dans l'atmosphère, conduisant à une augmentation du forçage radiatif jusqu'à 8,5 W/m² en 2100.

une baisse de la productivité de l'ensemble des facteurs de production $PROG_{f,s,t}$ (f étant alternativement le travail, le capital, les biens intermédiaires ou l'énergie) du secteur s considéré, de telle manière à diminuer dans la même proportion la production totale du secteur. Les baisses de productivité du travail, liées d'une

part à la dégradation des conditions de travail en extérieur et en intérieur (cf. figure III), et d'autre part à la hausse de l'absentéisme liée aux conditions de santé (cf. figure X), 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 le secteur s et l'année t :

$$PROG_{L,s,t} = PROG_CC_{L,s,t} \times PROG_CC_agri_{L,s,t} \times PROG_CC_elec_{L,s,t} \times PROG_CC_air_{L,s,t} \times PROG_CC_maladie_{L,s,t}$$

avec

$$PROG_CC_agri_{L,s,t} = \begin{cases} \text{fonction estimée} & \text{si } s = \text{agriculture} \\ 1 & \text{si } s \neq \text{agriculture} \end{cases}$$

et

$$PROG_CC_elec_{L,s,t} = \begin{cases} \text{fonction estimée} & \text{si } s = \text{électricité} \\ 1 & \text{si } s \neq \text{électricité} \end{cases}$$

$PROG_CC_air_{L,s,t}$ est la baisse de la productivité du travail liée aux conditions intérieures et extérieures,

$PROG_CC_maladie_{L,s,t}$ est la baisse de la productivité du travail liée à la hausse de l'absentéisme.

Pour les autres facteurs $f, f \neq L$:

$$PROG_{f,s,t} = PROG_CC_{f,s,t} \times PROG_CC_agri_{f,s,t} \times PROG_CC_elec_{f,s,t}$$

Pour l'ensemble des facteurs f :

$$PROG_CC_{f,s,t} = PROG_CC_{f,s,t-1} \times (1 + GR_PROG_{f,s,t})$$

où $GR_PROG_{f,s,t}$ est le gain de productivité du facteur f dans le secteur s en année t .

3.2. Les dommages aux actifs physiques

Les dommages liés à la montée du niveau de la mer (cf. figure V), au retrait-gonflement des argiles (cf. figure IX) et aux catastrophes naturelles (cf. figure XII) sont modélisés comme une hausse additionnelle du taux de dépréciation du capital sectoriel $K_{s,t}$, réparti entre les actifs immobiliers résidentiels $\delta'_{s,t}$ (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 .

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

$$\delta'_{s,t} = \delta_{t,s} + 0,31 \times (\delta_{t,mer} + \delta_{t,RGA} + \delta_{t,extreme})$$

$$\delta'_{BUIL k,t} = \delta_{BUIL k,t} + 0,69 \times (\delta_{t,mer} + \delta_{t,RGA} + \delta_{t,extreme})$$

$$C_t = c \times Revenu_t - 0,69 \times (\delta_{t,mer} + \delta_{t,RGA} + \delta_{t,extreme}) \times BUIL_t \times P_{BUIL}$$

3.3. La demande énergétique

L'évolution de la demande énergétique (cf. figure VI) est modélisée comme une variation du besoin d'énergie par m^2 $ENER_{perM^2}$ qui varie selon un coefficient $ENER_{perM^2_CC}$ qui dépend lui-même de la variation des températures.

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

On introduit un choc dans la fonction de la demande en énergie dans le secteur des services

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

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

3.4. Le commerce mondial

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

Pour chaque commodité c exportée :

$$WD'_{c,t} = WD_{c,t} \times WD_supplychain_t \times WD_tourisme_{c,t}$$

Avec :

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

$WD_supplychain_t$ est la baisse de la demande mondiale induite par les chaînes de valeur et s'applique à toutes les commodités exportées.

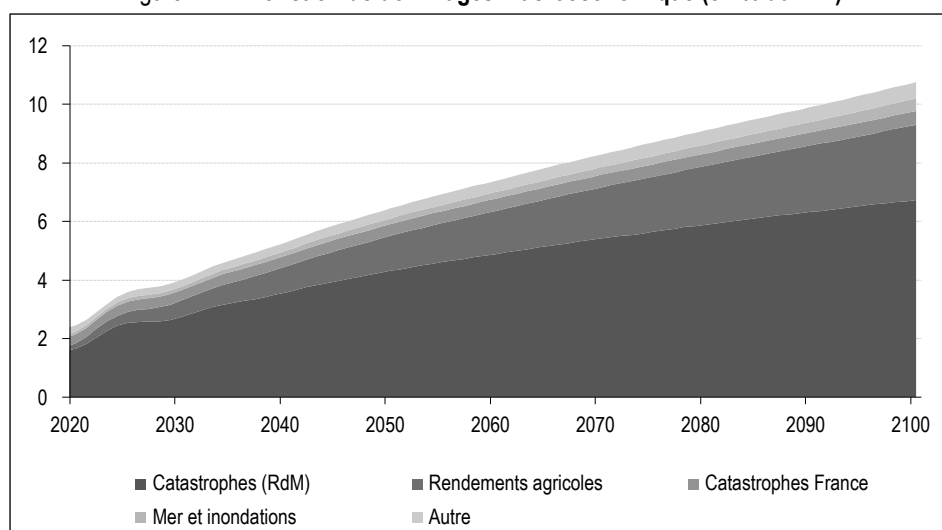
4. Évaluation du coût des dommages macroéconomiques et comparaison avec le NGFS

En introduisant ces fonctions de dommage, calibrées pour un scénario de réchauffement de +3,5 °C d'ici la fin du siècle (soit un scénario compatible avec le RCP 8.5⁷), il est possible d'estimer la fonction de dommages correspondante au niveau agrégé. Si la température devait atteindre ce niveau de réchauffement, les dommages du changement climatique pourraient coûter plus de 10 points d'activité annuelle par rapport à un scénario sans changement climatique (figure XIV). Ce scénario contrefactuel est donc fictif, dans la mesure où il n'inclut ni hypothèses de transition, ni coûts des dommages. 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).

7. Le scénario RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5) est un scénario d'évolution de la concentration de GES dans l'atmosphère, conduisant à une augmentation du forçage radiatif jusqu'à 8,5 W/m2 en 2100.

Figure XIV – Fonction de dommages macroéconomique (en % du PIB)



Note : 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 en France près de 2 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.

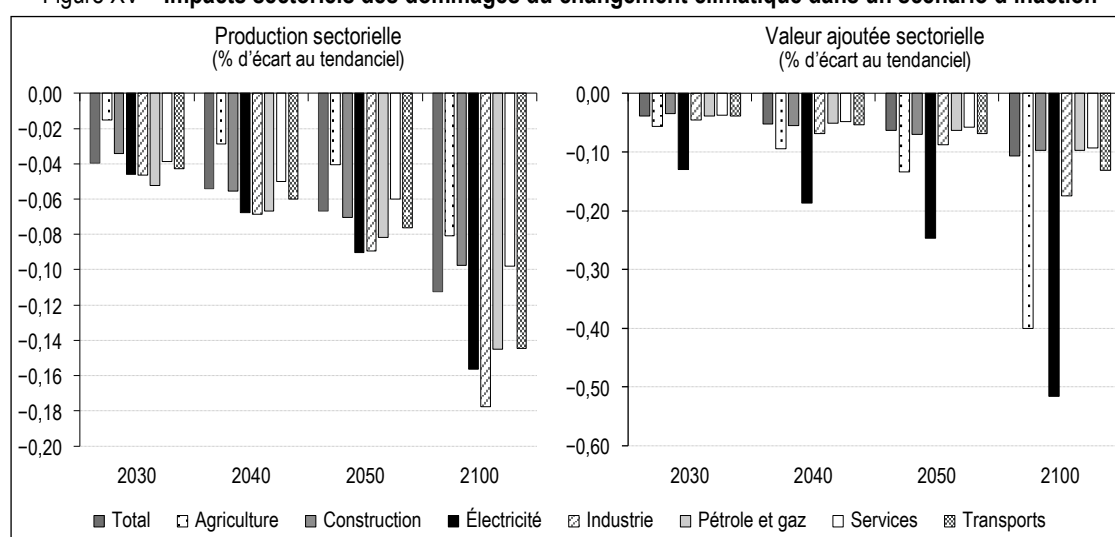
Source : simulation Three-ME associée à une hypothèse de réchauffement de +3,5 °C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

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 *et al.*, 2020).

Dans le détail, l'activité de l'ensemble des secteurs économiques serait significativement touchée (figure XV), bien que les risques et les effets soient très hétérogènes et aient des

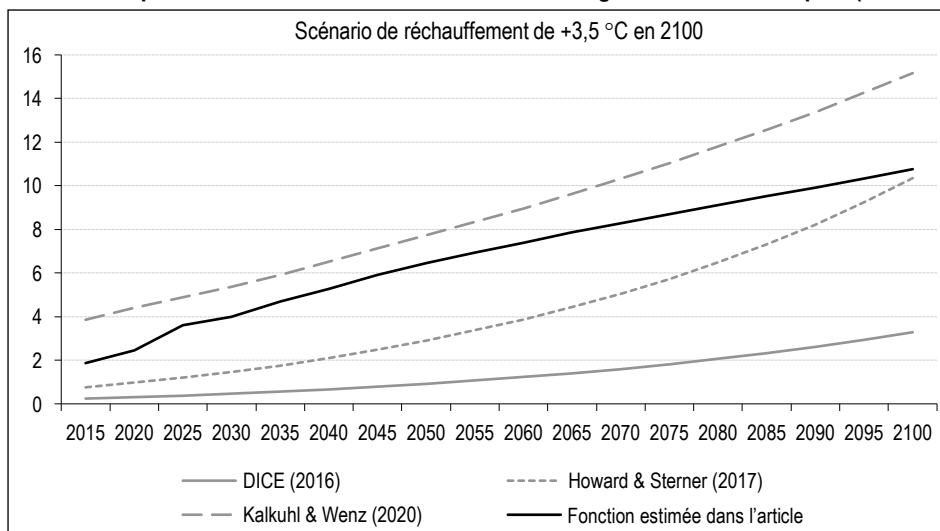
causes variées. Par construction, les principaux secteurs touchés sont avant tout les secteurs exportateurs (industrie et services). Les secteurs agricoles, ainsi que la production et distribution d'électricité, voient en l'absence de politique d'adaptation leur production baisser au même rythme que les rendements techniques. Toutefois, ils ne peuvent pas répercuter l'ensemble de la hausse des coûts de production liée à l'inflation et subissent donc des pertes 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

Figure XV – Impacts sectoriels des dommages du changement climatique dans un scénario d'inaction



Source : simulation Three-ME associée à une hypothèse de réchauffement de +3,5 °C en 2100 par rapport à l'ère préindustrielle.

Figure XVI – Comparaison avec d'autres fonctions de dommages macroéconomiques (en % du PIB)



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

catastrophes naturelles sur les infrastructures. Le secteur de la distribution d'énergies fossiles est pénalisé par la baisse globale de la demande agrégée, mais également par les flux de reconstruction et aménagement des vieux logements et bâtiments détruits et réhabilités dans des classes moins énergivores, ce qui fait comptablement baisser l'intensité énergétique des ménages.

Notre estimation se place pour l'instant dans la fourchette haute de la littérature. 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 *et al.*, 2020) tandis que les travaux de modélisation macroéconomique affichent des résultats très modestes (voir le tableau A1 de l'annexe). À titre de comparaison, notre estimation est rapportée aux fonctions de dommage faisant référence dans la littérature au niveau mondial et appliquées dans les premiers scénarios du NGFS (NGFS, 2020). Ces fonctions sont « *top down* », polynomiales et estimées au niveau mondial, au contraire de notre fonction qui est « *bottom-up* ». Les impacts estimés figurent parmi les plus élevés retenus par le NGFS (figure XVI).

5. Application à un scénario d'inaction

Les fonctions de dommages sectorielles proposées dans la section 2 sont maintenant incluses dans un exercice d'analyse de scénarios traditionnel. La simulation évalue pour l'occasion l'impact macroéconomique d'un scénario d'inaction par rapport à un scénario de transition ordonnée, dit « Net Zero 2050 » (NZ50). Pour construire ces scénarios, des hypothèses

macroéconomiques conservatrices sont appliquées à partir des travaux de l'ADEME sur les risques de transition (Boitier *et al.*, 2023) sans toutefois viser à reproduire la finesse des politiques climatiques évaluées dans les scénarios de la SNBC (Callonnec & Cancé, 2022).

5.1. Sentier de croissance partagé

Il est fait l'hypothèse de gains de productivité constants le long de la période, de 1 % par an en France et dans le reste du monde, soit l'hypothèse centrale des scénarios du Conseil d'orientation des retraites (2021). À long terme, l'économie nationale croît au rythme fixé par le sentier de croissance de Solow (1956), 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.

5.2. Hypothèses de transition

Les hypothèses du scénario de transition ordonnée regroupent :

- une action publique traduite par la hausse linéaire et anticipée des prix réels du carbone jusqu'à 900 €/tCO₂ en 2050⁸, niveau proche de la valeur tutélaire du carbone française⁹

8. En 2024, la composante carbone (qui est intégrée aux taxes intérieures de consommation sur les combustibles fossiles et est proportionnelle à leur contenu carbone) est de 44,6 €/tCO₂.

9. La valeur tutélaire du carbone représente le prix de la tonne émise de carbone équivalent (CO₂e) et permettant d'atteindre les objectifs français de lutte contre le réchauffement climatique. Cette valeur est utilisée par les pouvoirs publics pour orienter les politiques publiques, notamment en matière d'investissements, de fiscalité et de régulation environnementale.

(France Stratégie, 2019), avec une redistribution des recettes équitables entre entreprises et ménages (50/50) ;

- 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 énergies renouvelables (éolien, solaire) ;
- des prix de l'énergie projetés par l'Agence internationale de l'énergie (IEA, 2021), anticipant une moindre hausse des prix réels des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) en lien avec une modération continue de la demande ; une baisse de la demande énergétique fossile ;
- des hypothèses de commerce extérieur cohérentes avec les scénarios du NGFS, marqués par un phénomène global de relocalisation, une modération de la demande mondiale adressée à la France, mais une inflation plus dynamique des prix étrangers du fait d'une intensité carbone de la production plus faible en France.

5.3. Hypothèses climatiques

Les scénarios de température sont issus des simulations du NGFS à partir des différents modèles d'évaluation intégrée (ici le modèle REMIND-MAgPIE¹⁰). Comme le modèle Three-ME ne peut pas produire lui-même des scénarios climatiques, il reste dépendant des trajectoires de température associées aux narratifs du NGFS. Celles-ci sont donc appliqués de manière « exogène » au modèle. Le scénario de

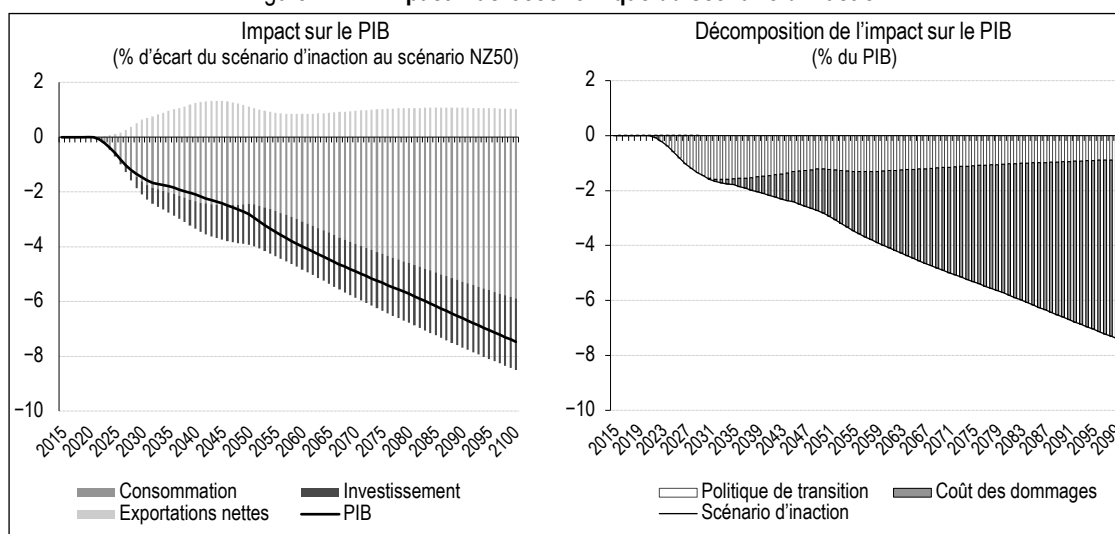
transition ordonné assure la limitation de l'élévation de température à +1,5 °C par rapport à son niveau de l'ère préindustrielle, tandis que dans le scénario d'inaction, la hausse de la température mondiale est de +3,5 °C à horizon de la fin du siècle, comme le suppose le scénario « *Hothouse world* » du NGFS (NGFS, 2020).

Le scénario d'inaction 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 comme l'absence des bénéfices observés dans le scénario ordonné. 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 (figure XVII et figure XVIII).

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 pétrole et gaz est largement bénéficiaire et la production de tous les autres secteurs recule (figure XVII et figure XVIII). Le bouclage macroéconomique permet de modéliser les effets d'entraînement négatifs ; par exemple, la hausse des prix agricoles se répercute sur le niveau des

10. REMIND-MAgPIE est un modèle dit « IAM » qui permet d'apprécier l'impact climatique des politiques de lutte contre le réchauffement climatique sur l'évolution des températures (Luderer et al., 2015).

Figure XVII – Impact macroéconomique du scénario d'inaction



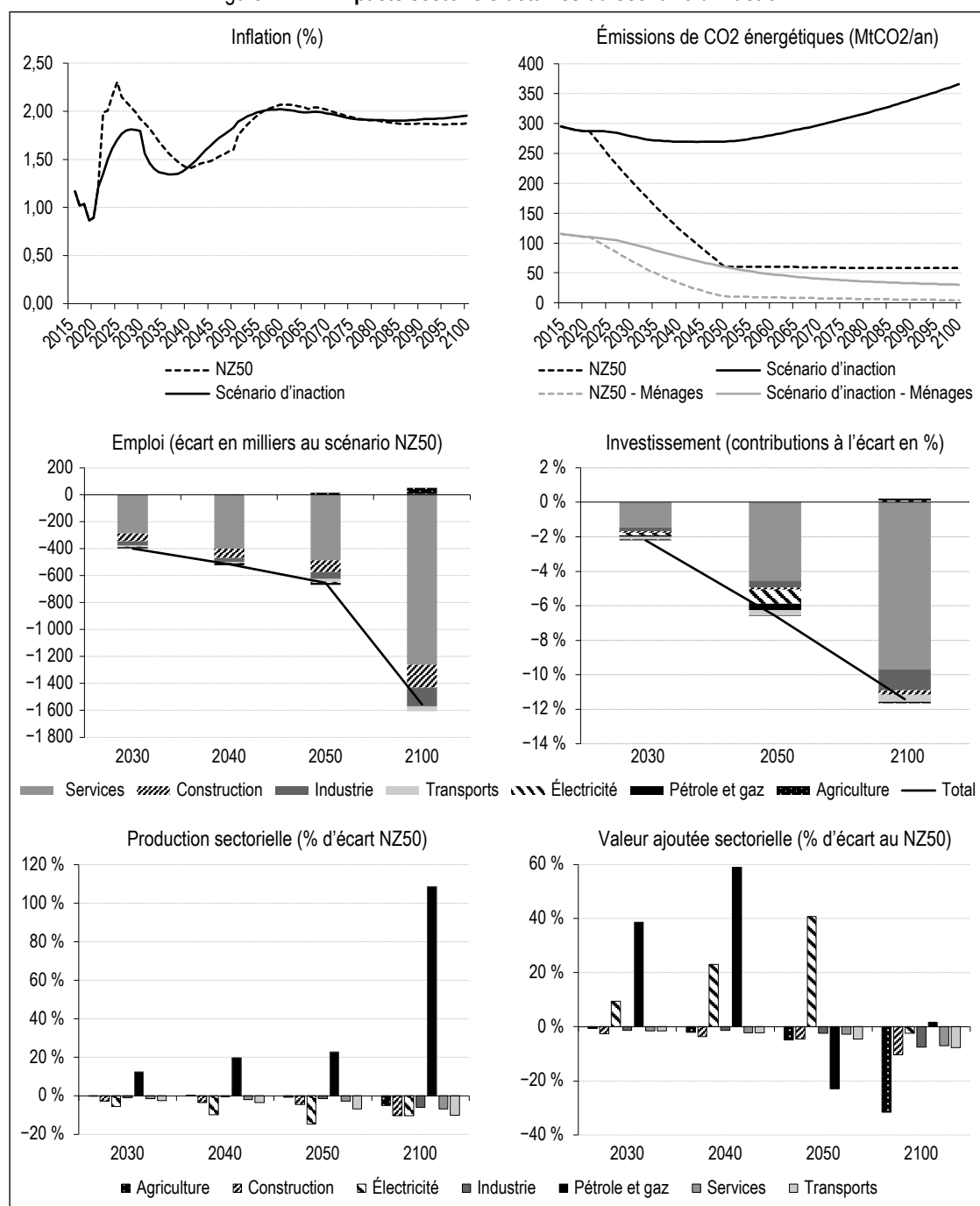
Source : modèle Three-ME modifié et intégrant les contraintes d'offre et les fonctions de dommages.

prix, des salaires et la compétitivité à l'export et l'emploi, ce qui pénalise l'activité et les revenus et se répercute sur les autres secteurs. En outre, comme l'alimentation est une consommation contrainte, l'augmentation des prix agricoles évince la consommation des ménages dans les autres secteurs.

À court terme, l'inflation est moins élevée que dans le scénario de transition, mais devient supérieure une fois les principales actions climatiques (du scénario de transition) mises en œuvre. Les

destructions d'emplois et la baisse de l'investissement sont principalement concentrées dans le secteur des services, bien que ce dernier ne soit pas directement exposé à la plupart des risques climatiques. D'une part, l'augmentation du prix de l'énergie et de l'alimentation entraîne une éviction sur l'achat de services ; d'autre part, toute baisse de consommation ou d'investissement a un effet d'entraînement négatif sur l'ensemble de l'économie, dont le tertiaire qui en représente près de 80 %.

Figure XVIII – Impacts sectoriels détaillés du scénario d'inaction



Source : modèle Three-ME modifié et intégrant les contraintes d'offre et les fonctions de dommages.

* *
*

En construisant des fonctions de dommages sectorielles, nous évaluons et comparons les conséquences monétaires des dommages sur un même indicateur économique (le PIB) et tenons compte des effets d'interaction et des effets dynamiques de ces dommages. Ce travail n'est pas exempt de certaines limites, liées en grande partie aux incertitudes qui pèsent sur l'ampleur des dommages : difficulté à modéliser les effets de moyen et de long terme des catastrophes naturelles, à modéliser la propagation des risques physiques dans le reste du monde et à modéliser les dégâts infligés aux actifs et leurs conséquences sur les agents. Les projections s'appuient toujours sur une hypothèse de croissance exogène et celle-ci est peu réaliste dans des scénarios climatiques qui voient un bouleversement des moyens de production.

Les modèles d'inspiration néokeynésienne restent également limités pour évaluer les limites physiques et les effets concrets d'une pénurie, qui se traduiraient par des effets de rationnement des agents par exemple, mais qui sortent du périmètre d'étude des modèles macroéconomiques (où l'équilibre est in fine assuré par les variations de quantité).

Or le changement climatique ne fait pas seulement peser une menace sur le rendement des facteurs et les coûts de production. Il peut s'accompagner d'une réduction brutale de la production dans certains secteurs ou certains endroits. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé des modifications du modèle Three-ME. Les simulations avant et après modification des blocs agricole et énergétique du modèle montrent de sensibles différences de résultats. L'impact des dommages sur les agrégats macroéconomiques est nettement plus élevé lorsqu'une contrainte quantitative avec une grande flexibilité des prix est introduite dans le modèle. 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).

Les secteurs exportateurs sont ici les principales victimes des effets du changement climatique. Les dommages dans les secteurs agricole et de la production d'électricité pourraient

également exposer l'ensemble de l'économie à un effet récessif systémique. Les pénuries subies alimenteraient une élévation des prix de marché des biens alimentaires et de l'électricité, en augmentant la dépendance nationale aux importations (en supposant qu'il n'y ait pas de pénurie mondiale généralisée). À ce titre, ces deux secteurs constitueraient les principales origines d'une hausse pérenne de l'inflation en France ; mais l'activité de l'ensemble des secteurs serait également pénalisée par une baisse de la demande puisque celle-ci dépend du revenu disponible « après consommation contrainte ». Les autres secteurs pourraient partiellement limiter leurs pertes en augmentant leurs prix de vente. Cela serait plus difficile 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.

L'introduction de fonctions de dommages dans les modèles pourrait permettre d'étendre le périmètre des scénarios de transition et de mieux rendre compte des contreparties économiques 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 et des nouveaux stress-tests climatiques financiers (Jacquetin, 2021). Ils gagneront à être réévalués et précisés en fonction de l'évolution de l'état de l'art et des outils de modélisation. Les impacts domestiques que nous avons estimés reposent pour l'instant essentiellement sur les dommages qui transitent par le commerce extérieur et ils sont sûrement sous-estimés, notamment car ils ne tiennent pas compte des coûts non marchands (biodiversité) et des coûts d'adaptation au changement climatique (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. Des modèles multirégions seraient alors plus pertinents pour « boucler » les flux commerciaux avec les conséquences des dommages estimées région par région, ce qui pousserait à élargir le périmètre « national » des travaux prospectifs à un champ plus large.

Par ailleurs, l'ensemble des chocs est ici introduit sous forme de changements graduels et linéaires pendant la période de transition, selon l'exemple du premier exercice de « stress-test climatique »

réalisé par la Banque de France (Allen *et al.*, 2020). Si les risques chroniques doivent se matérialiser à long terme, les épisodes intenses se multiplient déjà actuellement et menacent l'économie à court terme (sécheresse estivale de

2019, épisode de gel d'avril 2021 dans la région Rhône-Alpes). Anticiper les conséquences de ces catastrophes peut dépasser le cadre macro-économique traditionnel qui continue à renvoyer les risques climatiques à un horizon lointain. □

BIBLIOGRAPHIE

- Aaheim, A., Amundsen, H., Dokken, T. & Wei, T. (2012).** Impacts and adaptation to climate change in European economies. *Global Environmental Change*, 22(4), 959–968.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378012000672>
- ADEME (2016).** Mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations. Synthèse technique et synthèse de l'évaluation macro-économique.
<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-et-batiment/2881-mix-electrique-100-renouvelable-analyses-et-optimisations.html>
- ADEME (2020).** Évaluation 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*.
<https://www.hautconseilclimat.fr/wp-content/uploads/2020/07/valuation-dun-scenario-snbc2-sans-hausse-de-taxe-carbone-et-sans-prix-fictifs-ad-hoc-ademe.pdf>
- ADEME (2022a).** État des lieux et étude prospective sur les impacts du changement climatique pour le bâtiment aux horizons 2050 et 2100. Se préparer, s'organiser et agir collectivement. *ADEME Expertises*.
<https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/5969-etat-des-lieux-et-etude-prospective-sur-les-impacts-du-changement-climatique-pour-le-batiment-aux-horizons-2050-et-2100.html>
- ADEME (2022b).** Transitions 2050 - Feuilleton : Les effets macroéconomiques. *Horizons*.
https://librairie.ademe.fr/cadic/6940/feuilleton_macroéconomie_transitions2050_ademe.pdf
- Allen, T., Dees, S., Boissinot, J., Caicedo Graciano, C., Chouard, V., Clerc, L., De Gaye, A., Devulder, A., Diot, S., Lisack, N., Pegoraro, F., Rabaté, M., Svartzman, R. & Vernet, L. (2020).** Climate-Related Scenarios for Financial Stability Assessment: An Application to France. Banque de France, *Working Paper Series* N° 774. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3653131>
- Bardaji, J., Campagne, B., Khder, M.-B., Lafféter, Q., Simon, O., Dufernez, A.-S., Elezaar, C., Leblanc, P., Masson, E. & Partouche, H. (2017).** Le modèle macroéconométrique Mésange : réestimations et nouveautés. Insee, *Document de travail* N° G2017/04. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2848300>
- Berrittella, M., Bigano, A., Roson, R. & Tol, R. (2004).** A General Equilibrium Analysis of Climate Change Impacts on Tourism. *FEEM Working Papers* N° 127.04. <https://doi.org/10.2139/ssrn.609742>
- 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. *Social Science Research Network*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.944480>
- Boitier, B., Le Mouél, P., Zagamé, P., Callonnec, G., Garnero, M., Jacquetin, F., Allen, T., Dees, S., De Gaye, A., Lisack, N., Couix, Q., Dang, W. & Gherzi, F. (2023).** *Risques de transition : une analyse multi-modèles pour la France*. ADEME Expertises.
<https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/6196-risques-de-transition-analyse-multi-modeles-pour-la-france.html>
- Bosello, F., Eboli, F. & Pierfederici, R. (2012).** Assessing the Economic Impacts of Climate Change. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2004966>
- Bosello, F., Lazzarin, M., Roson, R. & Tol, R. (2004a).** Economy-Wide Estimates of the Implications of Climate Change: Sea Level Rise. *FEEM Working Papers* N° 96.04. <https://doi.org/10.2139/ssrn.556351>
- Bosello, F., Roson, R. & Tol, R. (2004b).** Economy-wide Estimates of the Implications of Climate Change: Human Health. *Ecological Economics*, 58(3), 579–591. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.07.032>
- Callonnec, G. & Cancé, R. (2022).** Évaluation macroéconomique de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC2) avec le modèle ThreeME. *Document de Travail*.
https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/%C3%89valuation%20macro%C3%A9conomique%20de%20la%20Strat%C3%A9gie%20nationale%20bas-carbone_0.pdf

- Callonnec, G., Landa Rivera, G., Malliet, P., Saussay, A. & Reynès, F. (2016).** Les propriétés dynamiques et de long terme du modèle ThreeME - Un cahier de variantes. *Revue de l'OFCE*, 149, 47–99.
https://ideas.repec.org/a/cai/reofsp/reof_149_0047.html
- 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.
<https://www.bankofengland.co.uk/speech/2015/breaking-the-tragedy-of-the-horizon-climate-change-and-financial-stability>
- CRED (2021).** Missing data on economic losses variables from EM-DAT. *Cred Crunch*, 63.
<https://www.preventionweb.net/publication/cred-crunch-issue-no-63-july-2021-missing-data-economic-losses-variables-em-dat>
- Ciscar Martinez, J., Feyen, L., Soria Ramirez, A., Lavalle, C., Raes, F., Perry, M., Nemry, F., Demirel, H., Rózsai, M., Dosio, A., Donatelli, M., Srivastava, A., Fumagalli, D., Niemeyer, S., Shrestha, S., ..., & Ibarreta Ruiz, D. (2014).** Climate Impacts in Europe - The JRC PESETA II Project. *JRC Scientific and Policy Reports*. <https://doi.org/10.2791/7409>
- Ciscar, J.-C., Iglesias, A., Feyen, L., Szabó, L., Van Regemorter, D., Amelung, B., Nicholls, R., Watkiss, P., Christensen, O.B., Dankers, R., Garrote, L., Goodess, C.M., Hunt, A., Moreno, A., Richards, J. & Soria, A. (2011).** Physical and economic consequences of climate change in Europe. *PNAS*, 108(7), 2678–2683.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1011612108>
- Conseil d'orientation des retraites (2021).** Quelles sont les raisons du ralentissement de la croissance de la productivité ? Secrétariat général du Conseil d'orientation des retraites, *Document de travail* N° 4. Séance plénière du 25 novembre 2021 à 10h00 « Choix des hypothèses économiques de long terme ».
https://www.cor-retraites.fr/sites/default/files/2021-11/Doc4_Raisons%20du%20ralentissement%20de%20la%20prod.pdf
- De Cian, E. & Sue Wing, I. (2019).** Global Energy Consumption in Warming Climate. *Environmental and Resource Economics*, 72, 365–410. <https://doi.org/10.1007/s10640-017-0198-4>
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10640-017-0198-4>
- 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 Papers*, 1065.
<https://ideas.repec.org/p/zbw/ifwkwp/1065.html>
- Delahais, A. & Robinet, A. (2023).** Coût de l'inaction climatique face au changement climatique en France : que sait-on ? France Stratégie, *Document de travail* N° 2023-01.
<https://www.strategie.gouv.fr/publications/cout-de-linaction-face-changement-climatique-france-sait>
- Dellink, R., Hwang, H., Lanzi, E. & Chateau, J. (2017).** International trade consequences of climate change. *OECD Trade and Environment Working Papers* N° 2017/01. <https://doi.org/10.1787/9f446180-en>
- Dietz, S., van der Ploeg, F., Rezai, A. & Venmans, F. (2020).** Are Economists Getting Climate Dynamics Right and Does It Matter? *CESifo Working Papers* N° 8122. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3545718>
- Eboli, F., Parrado, R. & Roson, R. (2009).** Climate Change Feedbacks on Economic Growth: Explorations with a Dynamic General Equilibrium Model. *IEFE Working Papers* N° 29. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1544260>
- ECB (2022).** 2022 Climate Stress Test.
https://www.bankingsupervision.europa.eu/ecb/pub/pdf/ssm.climate_stress_test_report.20220708~2e3cc0999f.en.pdf
- France Assureurs (2021).** Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050.
https://www.franceassureurs.fr/wp-content/uploads/2022/09/vf_france-assureurs_impact-du-changement-climatique-2050.pdf
- 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.
<https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-laction-climat>
- Gosling, S. N., Zaherpour, J. & Ibarreta, D. (2018).** PESETA III: Climate change impacts on labour productivity. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/07911>
- 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)*.
<https://brgm.hal.science/hal-01768395>
- Howard, P. & Sterner, T. (2017).** Few and Not So Far Between: A Meta-analysis of Climate Damage Estimates. *Environmental and Resource Economics*, 68, 197–225. <https://doi.org/10.1007/s10640-017-0166-z>
- IEA (2021).** *World Energy Outlook*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- IPCC (2023).** *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/9781009325844>

- Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S., Vautard, R., Donnelly, C., Koutroulis, A.G., Grillakis, M.G., Tsanis, I.K., Damm, A., Sakalli, A. & van Vliet, M.T.H. (2018).** Climate Impacts in Europe Under +1.5°C Global Warming. *Earth's Future*, 6, 264–285. <https://doi.org/10.1002/2017EF000710>
- Jacquetin, F. (2021).** *Stress-tests climatiques par scénarios : de l'analyse des risques à la modélisation*. ADEME Expertises. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4218-stress-tests-climatiques-par-scenarios-de-l-analyse-des-risques-a-la-modelisation.html>
- Kalkuhl, M. & Wenz, L. (2020).** The Impact of Climate Conditions on Economic Production. *Journal of Environmental Economics and Management*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102360>
- Kitous, A. & Després, J. (2018).** Assessment of the impact of climate change on residential energy demand for heating and cooling. *JRC Science for Policy Reports*. <https://doi.org/10.2760/96778>
- Kompas, T., Pham, V. H. & Nhu, 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, 1153–1173. <https://doi.org/10.1029/2018EF000922>
- Lafakis, C., Ratz, L., Fazio, E. & Cosma, M. (2019).** The Economic Implications of Climate Change. *Moody's Analytics*. <https://www.moodyanalytics.com/-/media/article/2019/economic-implications-of-climate-change.pdf>
- Lancesseur, N., Labrousse, C., Valdenaire, M. & Nakaa, M. (2020).** Impact économique du changement climatique : revue des méthodologies, d'estimation, résultats et limites. DG Trésor, *Documents de travail* N° 2020/4. <https://www.tresor.economie.gouv.fr/Articles/2020/07/10/document-de-travail-n-2020-4-impact-economique-du-changement-climatique-revue-des-methodologies-d-estimation-resultats-et-limites>
- Luderer, G., Leimbach, M., Bauer, N., Kriegler, E., Baumstark, L., Bertram, C., Giannousakis, A., Hilaire, J., Klein, D., Levesque, A., Mouratiadou, I., Pehl, M., Pietzcker, R., Piontek, F., Roming, N., Schultes, A., Schwanitz, V. J. & Streffer, J. (2015).** Description of the REMIND Model (Version 1.6). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2697070>
- Missirian, A. & Schlenker, W. (2017).** Asylum applications respond to temperature fluctuations. *Science*, 358(6370), 1610–1614. <https://doi.org/10.1126/science.aao0432>
- NGFS (2020).** *NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors*. <https://www.ngfs.net/en/ngfs-climate-scenarios-central-banks-and-supervisors>
- NGFS (2021).** *Climate Scenarios Database - Technical Documentation V2.2*. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/17511>
- Nordhaus, W. (1992).** An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases. *Science*, 258(5086), 1315–1319. <https://doi.org/10.1126/science.258.5086.1315>
- Nordhaus, W. (2016).** Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *Cowles Foundation Discussion Papers* N° 2057. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2881947>
- Nordhaus, W. & Moffat, A. (2017).** A Survey of Global Impacts of Climate Change: Replication, Survey Methods, and a Statistical Analysis. *Cowles Foundation Discussion Papers* N° 2096. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3009427>
- OCDE (2015).** *Les conséquences économiques du changement climatique*. Paris: OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264261082-fr>
- ONERC (2009).** *Changement climatique – Coûts des impacts et pistes d'adaptation*. Paris: La Documentation française. <https://www.vie-publique.fr/files/rapport/pdf/094000463.pdf>
- Paci, D. (2014).** Human Health Impacts of Climate Change in Europe. *JRC Technical Reports*. <https://doi.org/10.2791/64481>
- Pindyck, R. S. (2017).** The Use and Misuse of Models of Climate Policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100–114. <https://doi.org/10.3386/w21097>
- Reilly, J., Paltsev, S., Strzepek, K., Selin, N., Cai, Y., Nam, K.-M., Monier, E., Dutkiewicz, S., Scott, J., Webster, M. & Sokolov, A. (2012).** Valuing climate impacts in integrated assessment models: the MIT IGSM. *Climatic Change*, 117, 561–573. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0635-x>
- Reynès, F., Callonnec, G., Saussay, A., Landa, G., Malliet, P., Guéret, A., Hu, J., Hamdi-Chérif, M., Gouédard, H. (2021).** ThreeME Version 3 Multi-sector Macroeconomic Model for the Evaluation of Environmental and Energy Policy - A full description. https://www.threeme.org/_files/ugd/e33ac5_0fb7e9f40b3e413f87bbc132822dc816.pdf
- Roson, R. & van der Mensbrugghe, D. (2010).** Climate Change and Economic Growth: Impacts and Interactions. University Ca' Foscari of Venice, *Dept. of Economics Research Paper Series* N° 07_10. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1594708>

- Roson, R. & Sartori, M. (2016).** Estimation of climate change damage functions for 140 regions in the GTAP database. *Journal of Global Economic Analysis*, 1(2), 78–115. <https://doi.org/10.21642/JGEA.010202AF>
- RTE (2022).** Futurs énergétiques 2050. Rapport complet. <https://rte-futursenergetiques2050.com/documents>
- 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. https://www.coacch.eu/wp-content/uploads/2020/05/D2.4_after-revision-to-upload.pdf
- Solow, R. M. (1956).** A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65–94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., George, E. & Morin, S. (2019).** Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13(4), 1325–1347. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1325-2019>
- TCFD (2017).** Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures. <https://www.fsb-tcfd.org/recommendations>
- Tobin, I., Greuell, W., Jerez, S., Ludwig, F., Vautard, R., van Vliet, M. & Breon, F.-M. (2018).** Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 °C, 2 °C and 3 °C warming. *Environmental Research Letters*, 13(4). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab211>
- Vousdoukas, M., Mentaschi, L., Voukouvalas, E. & Feyen, L. (2019).** PESETA III – Task 8: Coastal Impacts. *JRC Technical Reports*. <https://doi.org/10.2788/204754>
- WWF France (2021).** Dérèglement climatique. Le monde du sport à +2°C et +4°C. Rapport. <https://www.wwf.fr/vous-informer/actualites/dereglement-climatique-sport>
- Zhao, C., Bing, L., Piao, S., Wang, X., Lobell, D.B., Huang, Y., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J.-L., Elliot, J., Ewert, F., Janssens, I.A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., Peng, S., Peñuelas, J., Ruane, A.C., Wallach, D., Wang, T., Wu, D., Liu, Z., Zhu, Y., Zhu, Z. & Asseng, T. (2017).** Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS*, 114(35), 9326–9331. <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>
-

ANNEXE
Tableau A1 – Revue des impacts macroéconomiques des risques physiques en Europe issus de l'approche « bottom-up »

Étude	Modèle	Scénario	Dommages étudiés	Effets macroéconomiques
Deke <i>et al.</i> (2001)	<u>DART</u> MEGC Monde dynamique multipays 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 points de PIB à consacrer à l'adaptation
Bosello <i>et al.</i> (2004b)	<u>GTAP-EF</u> MEGC Monde statique multipays multisectoriel	Scénario B1 (IPCC II)	Maladies vectorielles	-0,7 point de PIB
Bosello <i>et al.</i> (2004a)	GTAP-EF	Scénario B1 (IPCC II)	Niveau de la mer	-0,001 point de PIB
Berritella <i>et al.</i> (2004)	GTAP-EF	Scénario B1 (IPCC II)	Tourisme	-0,1 point de PIB
Bigano <i>et al.</i> (2006)	GTAP-EF	Scénario B1 (IPCC II)	Niveau de la mer Tourisme	-0,1 point de PIB
Eboli <i>et al.</i> (2009)	<u>ICES</u> MEGC Monde dynamique multisectoriel multipays	Scénarios A1B, A2, B1 (IPCC 2007)	Santé et productivité Rendements agricoles Tourisme Demande énergétique Niveau de la mer	+0,2 point de PIB
Roson & van der Mensbrugghe (2010)	<u>ENVISAGE</u> MEGC Monde dynamique multipays 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 point de PIB (2050) +1,2 point de PIB (2100)
Ciscar <i>et al.</i> (2011)	<u>GEM-E3 Europe</u>	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 point de PIB en 2080 (de 20 Md€ (2,5 °C) à 65 Md€ (5,4 °C) de pertes de PIB)
Bosello <i>et al.</i> (2012)	ICES	Scénario A1B (IPCC)	Niveau de la mer Tourisme Rendements agricoles Demande énergétique Inondations fluviales Productivité au travail Productivité des forêts	-0,15 point de PIB
Aaheim <i>et al.</i> (2012)	MEGC	Scénarios +2 °C et +4 °C	Événements extrêmes Rendements agricoles et sylvicoles Production électrique Demande énergétique Niveau de la mer Santé Tourisme	Jusqu'à -0,7 point de PIB (2080)
Ciscar <i>et al.</i> (2014)	<u>GEM-E3</u> MEGC Europe dynamique multipays multisectoriel	Scénario A1B (IPCC)	Rendements agricoles Demande énergétique Feux de forêt Niveau de la mer Tourisme Santé	-1,1 point de PIB
OCDE (2015)	<u>ENV-Linkages</u> MEGC Monde dynamique multipays multisectoriel	Scénario A1B (IPCC) et RCP 8.5	Événements extrêmes Rendements agricoles et sylvicoles Niveau de la mer Santé Demande énergétique Tourisme	-0,5 point de PIB (2060)

→

Tableau A1 – (suite)

Étude	Modèle	Scénario	Dommages étudiés	Effets macroéconomiques
Roson & 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	<u>France</u> 0 point de PIB +0,0002 point de PIB 0 point de PIB +0,0501 point de PIB -0,3515 point de PIB -0,30 point de PIB au total
Kompas <i>et al.</i> (2018)	<u>GTAP-INT</u> Modèle d'équilibre général intertemporel Monde multipays 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 point de PIB (+1 °C) à -0,662 point de PIB (+4 °C)
Lafakis (2019)	<u>Moody's Analytics Global Macroeconomic Model</u> Modèle structurel multipays	Scénarios RCP 2.6/4.5/6.0/8.5	Niveau de la mer Santé Productivité du travail Rendements agricoles Tourisme Demande énergétique	<u>France</u> +0,1 point 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.

