

Coût de l'inaction face au changement climatique en France : que sait-on ?

Adrien Delahais et Alice Robinet



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.



FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Coût de l'inaction face au changement climatique en France : que sait-on ?

Document de travail

Adrien Delahais* (Cired, École des Ponts),
Alice Robinet (France Stratégie)

(*) en poste à France Stratégie au moment de l'étude

Mars 2023

Table des matières

Résumé	5
Synthèse	7
Introduction	15
Chapitre 1 – Enjeux méthodologiques autour de l'évaluation des impacts du changement climatique	17
1. Un besoin de clarifier les terminologies.....	17
2. Impacts directs, interaction entre impacts et risques interrégionaux	19
3. Intérêt d'une approche en scénario témoin et scénarios de réchauffement	20
4. Passer des trajectoires d'émissions aux indicateurs physiques et aux indicateurs socioéconomiques.....	22
Chapitre 2 – Estimation des impacts attendus en France dans les principaux domaines affectés par le changement climatique	25
1. Ressource en eau	26
2. Agriculture.....	30
3. Forêt.....	35
4. Risques littoraux.....	39
5. Biodiversité.....	42
6. Énergie (offre et demande d'électricité)	46
7. Infrastructures et réseaux.....	50
8. Bâtiments	53
9. Tourisme.....	58
10. Santé.....	60
Conclusion	65
Bibliographie	69

Les auteurs remercient Claire Rais-Assa pour sa contribution précieuse, ainsi que l'ensemble des relecteurs, notamment l'Onerc, Vincent Viguié (Cired, École des Ponts) et Vivian Dépoues (I4CE).

Résumé

Que sait-on des coûts engendrés par le changement climatique à l'échelle nationale ? L'évaluation qualitative et quantitative des risques climatiques en France s'est considérablement enrichie depuis la dernière vision synthétique présentée par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique en 2009. Ce document de travail fait le point sur les enjeux méthodologiques relatifs à ces évaluations puis revient sur les éléments de quantification disponibles dans la littérature institutionnelle française, sous la forme de dix fiches sectorielles : ressource en eau, agriculture, forêt, risques littoraux, biodiversité, énergie (offre et demande d'électricité), infrastructures et réseaux, bâtiments, tourisme, santé. Il s'agit d'une vision à date de la littérature « grise » contribuant à la décision publique, et non d'une revue complète de la littérature scientifique récente en matière de risque climatique (un tel travail serait pertinent par ailleurs).

Il apparaît qu'une estimation fine, par secteur ou par territoire – dans le cadre d'une approche plus systémique –, reste encore un défi : l'hétérogénéité des horizons de temps et des scénarios climatiques retenus rend difficile la comparaison entre travaux et plusieurs risques identifiés qualitativement demeurent peu quantifiés. Dans beaucoup de cas, les évaluations sectorielles ne permettent pas de dégager un ordre de grandeur du coût des dommages. Le pilotage de l'évaluation des risques climatiques gagnerait à être renforcé, afin notamment de définir un cadre méthodologique d'évaluation conçu explicitement pour orienter les politiques publiques et provoquer l'action. Dans ce contexte, les liens pouvant exister entre atténuation et adaptation devront être pris en compte.

La connaissance des impacts du changement climatique doit être améliorée à tous les maillons de la chaîne de causalité, et en priorité à la maille territoriale, dans la perspective de piloter les politiques d'adaptation élaborées en grande partie à cette échelle. Les données collectées localement pourront servir de base à la construction d'une vision de la vulnérabilité nationale aux effets du changement climatique, vision pouvant s'appuyer sur un cadre méthodologique commun. Cependant, au regard de la complexité des transformations envisagées, les choix de politique publique devront se montrer robustes face aux incertitudes intrinsèques aux différents exercices de prospective. En tout état de cause, les besoins en matière d'évaluation des impacts ne doivent pas retarder la mise en œuvre des actions d'adaptation : dès lors que des actions dites « sans regret » ont pu être identifiées, celles-ci peuvent être déployées sans délai.

Mots clés : changement climatique, coûts, risques, impacts, national, évaluations, adaptation

Synthèse

La sécheresse en cours depuis 2022 rappelle une fois de plus que les effets de la crise climatique se font déjà ressentir, y compris en France. Au-delà des évaluations du Giec aux échelles mondiale ou européenne, au-delà des études territoriales réalisées pour certains secteurs, que peut-on dire des impacts attendus du changement climatique sur le territoire national ?

État des lieux et questions de méthodes

Ce document de travail présente un état des lieux simple et pédagogique des différentes évaluations d'impact du changement climatique en France, dans les principaux domaines affectés, sous la forme de dix fiches sectorielles : ressource en eau, agriculture, forêt, risques littoraux, biodiversité, énergie (offre et demande d'électricité), infrastructures et réseaux, bâtiments, tourisme, santé. Il revient également sur les grands enjeux méthodologiques autour de ces études et en dégage les principaux enseignements. Ce travail constitue ainsi une vision à date et non exhaustive de l'état des connaissances quantitatives sur les risques climatiques en France et, lorsqu'ils existent, de leurs coûts économiques ou socioéconomiques. Les estimations sectorielles fournissent une synthèse de la littérature « grise » contribuant à la décision publique, et non pas une revue complète de la littérature scientifique récente revenant sur l'ensemble des quantifications physiques et socioéconomiques en matière de risque climatique à l'échelle nationale (un tel travail gagnerait à être fait par ailleurs). Y sont recensés les impacts pour lesquels une quantification a pu être réalisée, avec au moins un indicateur pertinent identifié pour l'analyse socioéconomique. Ces évaluations sont caractérisées par une forte hétérogénéité, aussi bien dans leur objet d'étude (rendement des cultures, montant des sinistres indemnisés par les assurances, projections hydrologiques, etc.) que dans la méthode employée ou les types de résultats (monétaires ou non). Par conséquent, ces résultats n'ont pas vocation à être agrégés pour estimer un ordre de grandeur des coûts de l'inaction face au changement climatique, à mettre en regard des coûts de l'adaptation au changement climatique.

Le dernier exercice de synthèse des impacts du changement climatique à l'échelle française a été réalisé par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (Onerc) en 2009¹. Les impacts y sont décrits qualitativement et plusieurs éléments quantitatifs sont mis en avant, principalement vis-à-vis de la tension sur la ressource en eau, des enjeux assurantiels, agricoles, énergétiques, d'infrastructures et de tourisme. Sur l'ensemble de ces sujets, la progression de la connaissance a été substantielle, mais inégale. Des projets de modélisation ont été entrepris (Climator en

¹ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

agriculture, Explore 2070 pour la disponibilité de l'eau), des estimations nouvelles ont actualisé les données disponibles (assurances, infrastructures, production électrique). Cependant, un certain nombre de besoins sont identifiés.

Il est généralement difficile de dégager des visions sectorielles en matière de quantification des dommages, y compris dans les secteurs où des effets significatifs sont attendus (par exemple pour l'eau ou la biodiversité). Ces lacunes limitent les possibilités de monétarisation, rendant difficile de dégager des coûts sectoriels.

Renforcer l'analyse des risques climatiques implique une meilleure articulation des évaluations des dommages entre maille locale et maille nationale, encourageant les allers-retours entre les deux. Une analyse des coûts d'une éventuelle inaction au niveau local, comme demandé pour les actions mises en place dans le cadre des plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET)², est nécessaire pour mieux cerner les enjeux liés aux bâtiments, aux infrastructures, aux activités économiques locales exposées (par exemple, l'usage de l'eau) et aux éventuels effets de santé (par exemple, liés à la chaleur). Toutefois, trop peu des éléments fournis le sont en termes de coûts, qui permettraient de dégager des priorités et donner une idée de l'urgence. Au niveau national, les outils et référentiels méthodologiques déjà existants³ pourraient être renforcés par la mise à jour de certaines études servant de base aux services climatiques locaux (par exemple, le projet Climator sur l'évaluation de l'impact du changement climatique sur les rendements des cultures date de 2010-2012) et par la définition d'un cadre méthodologique commun.

Enfin, les analyses gagneraient à mieux prendre en compte les inégalités – que ce soit en matière d'exposition ou de vulnérabilité⁴ –, la sensibilité des résultats aux points de basculement climatique, ou la propagation au territoire national des risques « interrégionaux⁵ ». Dans ce contexte, le pilotage de l'évaluation des risques climatiques, portée par la définition d'un cadre méthodologique, gagnerait à être renforcé et constituerait un outil utile, notamment pour l'élaboration de politiques d'adaptation dimensionnées à la hauteur des enjeux. En tout état de cause, ces besoins ne doivent pas retarder la mise en œuvre des actions d'adaptation. En particulier, celles identifiées comme « sans regret »⁶ peuvent être déployées sans délai.

² Voir l'article R229-51 du Code de l'environnement.

³ L'outil *Drias* de Météo-France cartographie les projections climatiques sur le territoire ; le service *TACCT* (Trajectoires d'adaptation au changement climatique des territoires) de l'Ademe soutient les collectivités dans l'élaboration de leur politique d'adaptation ; le Cerema a proposé une méthodologie d'évaluation des coûts de l'inaction. Voir Cerema (2021), *Le coût de l'inaction face au changement climatique et à la pollution de l'air. Proposition de méthodologie d'évaluation*, rapport d'étude, décembre.

⁴ Vulnérabilité conditionnée par une plus ou moins grande résilience face au risque.

⁵ Dans la terminologie du Giec, les « risques interrégionaux » (*interregional risks*) désignent les conséquences induites dans une région du monde d'impacts physiques ayant lieu dans d'autres régions, tels les risques sur les chaînes d'approvisionnement, le système financier, les épidémies ou les migrations. Dans le cas de l'Europe, le Giec souligne l'exposition aux ruptures de chaîne d'approvisionnement (notamment agricoles). Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13 et encadré INTEREG du chapitre 16).

⁶ Dépoues V., Dolques G. et Nicol M. (2022), *Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France. De combien parle-t-on ?*, étude, I4CE, juin, 66 p.

Quelles évaluations par secteur ?

Les principaux résultats des études existantes en termes de dommages sectoriels liés aux risques climatiques sont de diverse nature : ressources naturelles (eau, forêt, biodiversité), actifs économiques (bâtiments, infrastructures), secteurs d'activité (agriculture, électricité, tourisme) ou impacts humains directs (santé, productivité du travail). Ces résultats ne couvrent pas de manière exhaustive l'ensemble des dommages potentiels, peuvent se recouper et sont établis à partir de méthodologies et de scénarios de réchauffement parfois très différents, ce qui limite leur comparabilité. De plus, les coûts de l'inaction étant parfois donnés par les coûts de l'adaptation spontanée des agents, la frontière entre les deux notions ne peut pas toujours être clairement explicitée.

Ressource en eau

Le rapport du Sénat sur l'adaptation au changement climatique cadre le problème de l'accès à la ressource en eau en suivant les résultats du programme ClimSec⁷ : de fortes tensions sur les ressources en eau pourraient se développer, alors que le niveau global des précipitations est et restera considérable en France. Cela s'explique par la non-coïncidence spatiale, et surtout temporelle, entre les besoins en eau et les ressources hydriques. Il ne pleuvra pas forcément où et quand le besoin d'eau sera le plus important. En particulier, les besoins sont sensiblement plus forts en été alors que la ressource est relativement plus abondante en hiver. Le projet Explore 2070⁸ propose des projections hydrologiques pour la France métropolitaine dans un scénario à haut niveau d'émissions et de forçage radiatif (le scénario RCP 6.0 du Giec⁹) et en comparant l'horizon 2046-2065 à la période 1961-1990. Une baisse significative de la recharge des nappes est prévue (de 10 % à 25 % en moyenne), particulièrement marquée pour le bassin de la Loire (25 % à 30 %) et pour le Sud-Ouest (30 % à 50 %). Par ailleurs, le débit annuel moyen des cours d'eau pourrait baisser de l'ordre de 10 % à 40 %, en particulier dans les cours d'eau des contreforts pyrénéens et, dans une moindre mesure, de la majorité du bassin hydrographique Seine-Normandie, avec des diminutions simulées comprises entre 10 % et 60 %. Les débits d'étiage seront par ailleurs plus sévères, plus longs et plus précoces, avec des débits estivaux réduits de 30 % à 60 %.

De nombreux secteurs sont exposés à des pertes économiques en cas de restriction de l'accès à l'eau : les secteurs de l'énergie (barrages hydroélectriques, refroidissement des centrales thermiques ou nucléaires), de l'agriculture (manque d'eau pour l'irrigation), du tourisme (lacs, activités nautiques) ou de l'industrie (aciérie ou chimie, par exemple). D'après Explore 2070, le déficit entre l'offre et la demande d'eau à disposition du secteur agricole

⁷ Météo-France (2011), *Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*, rapport final, mai, 72 p.

⁸ Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2012), « *Explore 2070* » et Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

⁹ *Representative Concentration Pathways* : trajectoire d'émissions et de niveau de forçage radiatif, c'est-à-dire la variation du flux radiatif net au sommet de l'atmosphère (exprimé en W/m^2) dû à la modification de facteurs externes à l'horizon 2100, utilisé par le Giec dans son cinquième rapport. Il en existe quatre (RCP 2.5, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5). Le scénario RCP 6.0 correspond à un forçage radiatif de $6 W/m^2$ d'ici 2100, correspondant à un réchauffement global entre $3 ^\circ C$ et $4 ^\circ C$. Le scénario RCP 8.5, le plus pessimiste, est fréquemment utilisé dans les références utilisées dans ce document.

passerait de 10 % à 23 % dans un scénario tendanciel sans adaptation. Cependant, aucune estimation des coûts induits par les déséquilibres entre offre et demande anticipés n'est proposée, à la fois au regard du caractère local de l'équilibre offre-demande et des incertitudes (modèles hydrologiques, choix politiques et techniques).

Agriculture

Le programme de recherche Climator¹⁰ a mis en avant une grande hétérogénéité de l'évolution des rendements agricoles de quelques cultures emblématiques, avec un impact négatif sur la culture du maïs mais potentiellement positif sur celle du blé tendre. Néanmoins, ces résultats supposent que le déficit hydrique futur sera compensé par davantage d'irrigation, ce qui devrait être remis en question par l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Plus récemment, le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) a proposé une première estimation partielle des dommages liés aux seules catastrophes naturelles sur la « ferme France » de un milliard d'euros par an à l'horizon 2050, sans toutefois la relier à une modélisation climatique explicite. Les auteurs soulignent la nécessité de poursuivre une évaluation plus précise des coûts liés au changement climatique pour l'agriculture française au niveau local, étant donné les spécificités des couples filière-territoire sur chaque territoire¹¹.

Forêt

L'impact combiné de la hausse des émissions de gaz à effet de serre (GES) et du changement climatique sur la forêt est complexe : si l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique est en théorie bénéfique pour la croissance des arbres, une plus haute température moyenne accroît le déficit hydrique, augmente la probabilité de feux de forêt et encourage l'apparition de nouveaux pathogènes¹². En 2009, l'Onerc rapportait que le changement climatique pourrait avoir un impact positif sur la productivité forestière à l'horizon 2030-2050 et négatif à l'horizon 2100. Plus récemment, le projet Climator¹³ estime que le déficit hydrique pourrait entraîner une baisse du rendement moyen national du pin de 5 % entre 2020 et 2050 et jusqu'à 12 % entre 2070 et 2100, dans le scénario RCP 6.0 du Giec. Par ailleurs, d'après un rapport du Sénat¹⁴, les surfaces brûlées en région méditerranéenne pourraient augmenter de 80 % d'ici 2050 (RCP 4.5). Le risque s'étendrait à des zones aujourd'hui peu impactées : près de 50 % des landes et forêts métropolitaines pourraient être concernées par un niveau élevé de l'aléa feux de forêt, contre seulement un tiers en 2010¹⁵.

L'évaluation des risques portant sur le secteur forestier est d'autant plus importante que la forêt est à la fois source de biomasse et génératrice de puits de carbone. Sa détérioration

¹⁰ Ademe (2012), *Livre Vert du projet Climator (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, 334 p. Climator utilise les scénarios SRES, ancêtres des scénarios RCP, et privilégie le scénario A1B, qui correspond au RCP 6.0.

¹¹ CGAAER (2022), *Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires*, rapport n° 21044, avril, 117 p.

¹² Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts...*, op. cit.

¹³ Ademe (2012), *Livre Vert du projet Climator...*, op. cit.

¹⁴ Audition de François Pimont, ingénieur de recherche à l'Inrae, cité dans Sénat (2022), *Feux de forêt et de végétation. Prévenir l'embranchement*, rapport d'information de M. Jean Bacci, Mme Anne-Catherine Loisier, MM. Pascal Martin et Olivier Rietmann, fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable et de la commission des affaires économiques, août.

¹⁵ CGEDD, CGAAER et IgF (2010), *Rapport de la mission interministérielle Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêt*, rapport final, juillet, 190 p. (à partir de données Météo-France).

pourrait donc nuire aux objectifs de neutralité. D'après une étude de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae) et de l'Institut géographique national (IGN)¹⁶, le stockage carbone annuel dans l'écosystème forestier pourrait, à l'horizon 2050, être de l'ordre de 40 % plus faible dans le scénario climatique RCP 8.5 qu'à climat actuel. À titre de comparaison, l'Onerc prévoyait dès 2009 une baisse de la productivité forestière annuelle, et donc de l'accroissement du stock de carbone, de 6 % à 16 % à l'horizon 2100. Dès aujourd'hui, le Haut Conseil pour le climat (HCC)¹⁷ rapporte que les puits nets de carbone liés aux forêts ont diminué de 72 % de 2013 à 2019, en partie pour des raisons méthodologiques, mais également à cause de la détérioration du puits forestier sous l'effet de la diminution de la production biologique, de l'augmentation des prélèvements et de la mortalité (sécheresse, tempêtes, incendies, scolytes).

Risques littoraux

D'après le premier volume du sixième rapport d'évaluation du Giec, le niveau moyen global des mers a augmenté de 14 à 25 centimètres entre 1901 et 2018. Cette augmentation du niveau de la mer entraîne d'une part des phénomènes de recul du trait de côte et, d'autre part, une augmentation des risques de submersion marine. Déjà visible sur 20 % du littoral métropolitain, le recul du trait de côte a également des causes anthropiques directes (artificialisation, modification des transports de sédiments). À l'horizon 2100, le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) estime qu'entre 5 000 et 50 000 logements, pour une valeur entre 0,8 et 8 milliards d'euros, seraient directement menacés par l'érosion côtière¹⁸. Au même horizon temporel mais en étendant le champ d'analyse aux risques de submersion marine, Callendar, start-up française spécialisée dans l'évaluation des risques climatiques, aboutit à une fourchette de 30 000 à 150 000 logements concernés, pour une valeur entre 10 et 50 milliards d'euros. Par ailleurs, France Assureurs estime le surcoût lié aux submersions marines à 100 millions d'euros annuels, presque intégralement dû au changement climatique, sur la période 2020-2050 selon le scénario RCP 8.5¹⁹.

Enfin, au-delà du champ des logements mentionnés *infra*, on remarque qu'on ne dispose pas de synthèse de l'exposition des infrastructures et des activités économiques aux risques littoraux.

Biodiversité

L'IPBES²⁰ indique que le changement climatique est l'une des principales causes de l'érosion de la biodiversité, avec la modification de l'usage des sols et des milieux aquatiques (pertes et fragmentation d'habitats), la surexploitation de la biodiversité (chasse, braconnage, surpêche), la pollution (de l'eau, de l'air, des sols) et l'introduction d'espèces envahissantes. D'après les travaux menés dans le cadre de l'évaluation française des écosystèmes et des services

¹⁶ Roux A., Colin A., Dhôte J.-F. et Schmitt B. (2020), *Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique. Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie*, Paris, Quae, 152 p.

¹⁷ HCC (2022), *Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 216 p.

¹⁸ Cerema (2020), *Connaissance du trait de côte. Évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte*, rapport d'étude, coll. « Connaissance », janvier, 23 p. L'effet du changement climatique sur l'augmentation du niveau de la mer n'est pas explicitement modélisé dans ces travaux : les auteurs considèrent que ce phénomène est décrit implicitement dans leur scénario où le recul du trait de côte (actuellement à l'œuvre sur 20 % de la bande côtière) est étendu à l'ensemble du littoral.

¹⁹ France Assureurs (2021), « *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050* », étude, octobre, 30 p.

²⁰ *Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*.

écosystémiques (Efese)²¹, le changement climatique affecte et affectera durablement les écosystèmes métropolitains (forêts et écosystèmes agricoles, écosystèmes de haute montagne), entraînera une hausse des situations de stress hydrique auxquelles sont exposés les milieux aquatiques terrestres et induit déjà des modifications des milieux qui impactent la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins. À cela s'ajoute une vulnérabilité particulière des écosystèmes ultramarins (perturbation récente et de grande ampleur de la forêt amazonienne, exposition accrue aux incendies des écosystèmes altimontains réunionnais ou très forte vulnérabilité des écosystèmes coralliens).

Pour autant, hormis les travaux de l'Efese, les connaissances sur les conséquences physiques et socioéconomiques du déclin de la biodiversité demeurent aujourd'hui lacunaires. Au-delà du potentiel d'activité économique directement lié aux écosystèmes, certains services non marchands (services écosystémiques) échappent au périmètre des évaluations socioéconomiques, en dehors de quelques estimations de consentement à payer.

Énergie (offre et demande d'électricité)

Côté demande, le réchauffement entraînera une baisse de la consommation de chauffage et un recours accru à la climatisation (respectivement, principalement en hiver et en été). D'après RTE, les économies d'énergie ainsi réalisées sur le chauffage et les dépenses nouvelles liées à la climatisation seraient globalement équivalentes à l'horizon 2050 (scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5)²², ce qui contribuerait à lisser la demande dans l'année.

Côté offre, les aléas climatiques et la tension sur la ressource en eau pourraient affecter la production nucléaire et la production hydroélectrique, mais de manière *a priori* modérée : par exemple, le risque d'indisponibilité simultanée du parc nucléaire en bord de fleuve à un instant donné doit passer de 4 Gigawatt (GW) une année sur dix en 2000 à 6 GW en scénario RCP 4.5 et 8,5 GW en scénario RCP 8.5 à l'horizon 2050. Dans un contexte d'augmentation de la consommation en été, ces pertes de puissance peuvent ne pas être négligeables. Les auteurs insistent néanmoins sur l'incertitude autour de l'évolution du débit réel des cours d'eau à long terme (liée à l'augmentation éventuelle des besoins en eau des autres secteurs et à l'incertitude inhérente aux projections hydrologiques) et sur les conséquences sur les réservoirs hydrauliques à la fin de l'automne, entraînant des risques de sécheresse prolongée. Cependant, le scénario météorologique identifié comme étant le plus à risque, qui pourrait se produire une fois tous les vingt ans, est la conjonction d'un manque de vent et d'une vague de froid sur une grande partie de l'Europe. Il serait donc localisé en saison froide, ce qui l'expose moins à la réduction des capacités de production nucléaires et hydroélectriques due aux épisodes de sécheresses et de fortes chaleurs.

Infrastructures et réseaux

Les impacts du changement climatique sur les réseaux de transport terrestre, d'électricité et de télécommunications sont décrits qualitativement dans une publication récente de France Stratégie²³. Une étude de Carbone 4 a proposé une méthodologie d'estimation des coûts des dommages aux infrastructures de réseaux à l'échelle française pour certains secteurs en

²¹ CGDD (2020), *Du constat à l'action. Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques*, Paris, La Documentation française, 266 p.

²² RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050*, rapport complet, juin, 988 p. (chapitre 8).

²³ Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « *Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir* », France Stratégie, *La Note d'analyse*, n° 108, mai, 12 p.

scénario RCP 8.5, à l'horizon 2050, en se fondant sur des cas types d'infrastructures (françaises ou étrangères) existantes, ou des études à l'échelle européenne²⁴. À titre d'exemple, les surcoûts induits par ce scénario s'élèveraient à 1,5 milliard d'euros par an pour les réseaux routiers entre 2035 et 2050, soit 10 % du budget total alloué à la rénovation des routes en France chaque année. Des coûts plus modestes sont avancés pour les infrastructures ferroviaires, le réseau d'électricité et le transport aérien. Ces chiffrages sont des premiers ordres de grandeur et d'autres estimations seraient nécessaires pour les confirmer (ou les infirmer). En particulier, la mise en place d'une structure de gouvernance nationale des risques sur les infrastructures, s'appuyant sur des expérimentations territoriales, serait un cadre idéal d'évaluation de ces coûts²⁵.

Bâtiments

Plusieurs exercices prospectifs portant sur l'évolution de la charge des sinistres supportés par les assureurs ont été réalisés depuis la revue de l'Onerc. Les portefeuilles incluent la quasi-totalité des logements privés et les bâtiments professionnels. D'après France Assureurs, le montant moyen des sinistres liés aux catastrophes naturelles (sécheresses/retrait-gonflement des argiles, inondations, submersion marine, tempêtes) devrait doubler à l'horizon 2050, passant de 2,4 milliards d'euros par an (1989-2019) à 4,6 milliards d'euros par an (2020-2050) dans le scénario RCP 8.5. Plus d'un tiers de cet accroissement est dû au changement climatique (35 %), 53 % à l'augmentation des valeurs assurées, 7 % à la variabilité naturelle du climat et 5 % à la répartition géographique des valeurs assurées²⁶. D'après l'ensemble des études du secteur assurantiel, l'accroissement de la valeur des sinistres dû au seul changement climatique se situe entre + 20 % et + 60 %. Selon la source, l'aléa à l'origine de la plus forte augmentation des sinistres en valeur absolue est soit la sécheresse/le retrait-gonflement des argiles (France Assureurs), soit l'inondation (Covéa). À l'inverse, les modèles climatiques ne prévoient pas d'augmentation des dommages liés à l'aléa tempête du fait du changement climatique. D'après France Assureurs, les dommages liés à l'accroissement du retrait-gonflement des argiles passerait de 450 millions d'euros par an sur la période 1989-2019 à 1,3 milliard d'euros par an sur 2020-2050, et 59 % de cette hausse serait due au réchauffement climatique. Les sinistres seraient particulièrement concentrés dans le sud-ouest du territoire.

Tourisme

Le secteur du tourisme de ski a été et demeure pionnier dans l'analyse des risques climatiques. Déjà en 2009, l'Onerc donnait une estimation du nombre de stations de ski françaises bénéficiant d'un enneigement « fiable » qui pourrait diminuer de 30 % à plus de 60 % selon le niveau de réchauffement (à + 2 °C ou + 4 °C) d'après une étude de l'OCDE²⁷. Récemment, une étude sur les conséquences locales du changement climatique sur l'enneigement²⁸ a avancé des résultats plus pessimistes : dans les Pyrénées, sous un

²⁴ Carbone 4 (2021), *Le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France*, rapport complet, décembre, 105 p.

²⁵ Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « *Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir* », *op. cit.*

²⁶ France Assureurs (2021), « *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050* », étude, octobre, 30 p.

²⁷ OCDE (2006), *Changements climatiques dans les Alpes européennes. Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*, 136 p.

²⁸ Spandre P., François H., Verfaillie D., Pons M., Vernay M., Lafaysse M., George E. et Morin S. (2019), « *Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical*

réchauffement global de + 2 °C²⁹, seules trois stations pourraient encore compter un enneigement naturel et la moitié des stations ne pourraient plus fonctionner selon les critères actuels d'exploitation, même à l'aide de neige artificielle. À + 4 °C, aucune station des Pyrénées ou des Alpes ne présenterait un enneigement naturel fiable : seulement une vingtaine de stations dans les Alpes pourraient fonctionner, sous condition d'enneigement artificiel, car l'épaisseur du manteau neigeux en hiver y serait diminuée de 80 % (contre seulement - 30 % à + 2 °C). D'autres types de tourisme pourraient être affectés (dans un contexte de hausse des températures estivales ou d'accroissement de la tension sur l'eau).

Santé

Le risque le plus identifié du changement climatique sur la santé humaine est celui lié à l'accroissement en fréquence et en intensité des vagues de chaleur (accroissement de la fatigue, perte d'attention, symptômes cardiovasculaires, troubles de la grossesse, sollicitation accrue du système de santé, surmortalité). Ces événements sont déjà associés à une surmortalité (+ 10 700 décès depuis 2015, dont 2 820 en 2022³⁰). Le coût cumulé entre 2015 et 2020 en France métropolitaine de cette surmortalité est estimé entre 16 et 30 milliards d'euros par Santé publique France³¹, auquel s'ajoutent des pertes de bien-être liées à une restriction d'activité les jours de plus forte chaleur de 6 milliards d'euros³². D'après Santé publique France³³, à partir d'une étude statistique d'ampleur mondiale (fondée sur des relations température-mortalité utilisées évaluées au niveau local), la part de la mortalité future attribuable aux extrêmes de température (chaleur et froid) varierait entre 0,1 % (RCP 2.6, faibles émissions) et 1 % (RCP 8.5, fortes émissions) en 2050 et entre 0,2 % (RCP 2.6, faibles émissions) et 4 % (RCP 8.5, fortes émissions) en 2100. D'autres risques sanitaires, comme l'accroissement de la transmissibilité des maladies infectieuses, sont décrits de manière qualitative mais ne sont pas quantifiés au niveau français sous climat futur.

adaptation », *The Cryosphere*, vol. 13(4), avril, p. 1325-1347, cité dans WWF (2021), *Dérèglement climatique. Le monde du sport à +2 °C et +4 °C*, rapport, juillet, 63 p.

²⁹ Scénario RCP 2.6 dans l'étude.

³⁰ Données Santé publique France.

³¹ Adélaïde L., Chanel O. et Pascal M. (2021), « Évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020 », Santé publique France, *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, n° 12, p. 215-233. La mortalité est exprimée soit en années de vies perdues (16 milliards d'euros), soit en nombre de décès supplémentaires (30 milliards d'euros).

³² La restriction d'activité correspond à des périodes de chaleur extrême (deux jours en 2019 et quatre à cinq jours en 2020) et est évaluée à 43 euros par personne exposée et par jour d'activité restreinte, suivant plusieurs études internationales. Cette valeur est recommandée par Ready R., Navrud S., Day B. *et al.* (2004), « Benefit transfer in Europe: How reliable are transfers between countries? », *Environmental and Resource Economics*, n° 29, p. 67-82.

³³ À partir de Gasparrini A., Guo Y., Sera F. *et al.* (2017), « Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios », *The Lancet Planetary Health*, vol. 1(9), décembre, p. e-360-e367, cité dans Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p. (audition de Santé publique France).

Introduction

Afin d'alimenter les réflexions autour du volet dédié à l'adaptation au changement climatique de la future stratégie française pour l'énergie et le climat, France Stratégie a réalisé une synthèse de l'existant concernant la quantification des impacts du changement climatique anticipés à l'échelle française. Cette synthèse constitue par ailleurs un pendant à l'évaluation des coûts liés à la mise en œuvre des stratégies d'adaptation, entamée par l'Institut de l'économie pour le climat (I4CE)³⁴. Ce travail de revue de la littérature présente une vision à date, partielle, des impacts du changement climatique attendus en France dans les principaux domaines affectés, sous la forme de dix fiches sectorielles : ressource en eau, agriculture, forêt, risques littoraux, biodiversité, énergie (offre et demande d'électricité), infrastructures et réseaux, bâtiments, tourisme, santé.

En effet, les impacts décrits sont ceux pour lesquels des évaluations quantitatives sont disponibles, ainsi qu'un indicateur pertinent pour l'analyse socioéconomique. Ce panorama ne constitue donc pas une vision exhaustive des effets du changement climatique sur la société française. Il complète certains éléments du dernier rapport de synthèse sur le sujet de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (Onerc)³⁵, datant de 2009, et vise à contribuer, à ce titre, à son actualisation. Par ailleurs, le plan climat-air-énergie territorial (PCAET) précise que les stratégies territoriales doivent faire état des conséquences socioéconomiques des actions mises en place, en prenant en compte son coût ainsi que celui d'une éventuelle inaction³⁶.

Ce document de travail discute dans un premier chapitre des enjeux méthodologiques relatifs aux évaluations des impacts du changement climatique. Le deuxième chapitre est composé des dix fiches sectorielles constituant la revue de la littérature. Enfin, la conclusion revient sur les principaux enseignements retirés de la revue et propose des pistes pour faciliter de futurs exercices d'évaluation des effets du changement climatique.

³⁴ Dépoues V., Dolques G. et Nicol M. (2022), *Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France. De combien parle-t-on ?*, étude, I4CE, juin, 66 p.

³⁵ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

³⁶ Voir l'article R229-51 du Code de l'environnement.

Chapitre 1

Enjeux méthodologiques autour de l'évaluation des impacts du changement climatique

1. Un besoin de clarifier les terminologies

Une terminologie pour désigner les conséquences du changement climatique sur nos sociétés a été développée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec)³⁷. On s'intéresse ici aux coûts de l'inaction face au changement climatique dans nos sociétés. On appelle « aléa climatique » une manifestation physique, sous la forme d'un événement brutal (tempête, canicule) ou d'un stress chronique (température moyenne plus élevée), qui est susceptible d'entraîner des pertes, des dommages ou des bénéfices pour les éléments exposés. L'« exposition » est définie comme la localisation d'un enjeu dans un espace soumis directement ou indirectement à un aléa. Les éléments exposés peuvent néanmoins être plus ou moins sensibles à l'aléa, c'est ce qui constitue leur « vulnérabilité ». Le « risque » lié à un impact du changement climatique provient de la coexistence d'un aléa climatique, d'une exposition et d'une vulnérabilité.

Les impacts du changement climatique peuvent prendre de multiples formes : ils peuvent s'exprimer en termes monétaires (pertes de capital dues à la destruction d'infrastructures par exemple) ou en termes non monétaires, à l'aide d'indicateurs décrivant les conséquences d'un aléa (surmortalité due aux vagues de chaleur par exemple).

Les coûts engendrés par ces impacts peuvent être envisagés à différents niveaux d'atténuation mais également à différents niveaux d'adaptation : l'expression « coût de l'inaction » peut se révéler ambiguë et désigner l'inaction en termes d'atténuation ou d'adaptation. Dans le cadre actuel des politiques publiques climatiques, nous nous intéressons aux impacts du changement climatique sous la forme de coûts de l'inaction en termes d'adaptation, sous différents scénarios de réchauffement (Encadré 1).

Les éléments présentés dans ce document de travail sont la plupart du temps donnés sans prendre en compte les capacités d'adaptation spontanée des acteurs économiques (comme la relocalisation de certains types de cultures agricoles), ou l'émergence

³⁷ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 1).

d'éventuelles politiques publiques d'adaptation au changement climatique. Les coûts de l'inaction sont donc à distinguer des coûts de l'adaptation – dont I4CE propose de premiers éléments de quantification³⁸ – et des coûts engendrés par la mise en œuvre de politiques de transition écologique³⁹.

Encadré 1 – Qu'entend-on par « coût de l'inaction » ?

Mentionné par l'article R229 du Code de l'environnement relatif au PCAET, l'expression « coût de l'inaction face au changement climatique » peut recouvrir plusieurs réalités. Cette expression désignait initialement, comme dans le rapport de Nicholas Stern⁴⁰ paru en 2006, les implications économiques, sociales et environnementales du changement climatique en l'absence de politiques d'atténuation. L'objectif était de montrer que le coût des politiques d'atténuation était plus faible que le coût de l'inaction (absence de politique d'atténuation). Aujourd'hui, les politiques d'atténuation sont désormais cadrées par des objectifs nationaux explicites en termes de réduction de gaz à effet de serre (à travers notamment la stratégie nationale bas-carbone et, pour l'Union européenne, l'objectif de neutralité carbone en 2050). C'est pourquoi l'expression « coût de l'inaction » est aujourd'hui utilisée dans le cadre des politiques d'adaptation des territoires au changement climatique, ces calculs étant déclinés selon plusieurs trajectoires de réchauffement, et pouvant ainsi informer la décision publique sur les priorités d'adaptation.

Dans ce cadre, calculer en pratique le coût de l'inaction revient à se demander quel serait le coût (exprimé à l'aide des indicateurs pertinents, qui ne seront pas forcément monétaires) d'une absence de politiques d'adaptation au niveau du territoire dans un secteur considéré. Au sens strict, le coût de l'inaction doit se calculer en comparant des scénarios futurs avec réchauffement supplémentaire à un scénario « témoin » futur à climat actuel (voir la section 3 de ce chapitre), afin d'isoler les effets uniquement dus au changement climatique à venir.

Une grande partie des études présentées dans ce document de travail affichent leurs résultats en comparant les variables d'intérêt dans leur valeur sous climat futur à leur valeur actuelle. Cela ne pose pas de problème si le climat est l'unique cause d'évolution en jeu, ou si l'on veut se faire une vision globale des coûts à venir, qu'ils soient d'origine climatique ou non. De même, les impacts négatifs déjà observés peuvent être ajoutés aux coûts de l'inaction.

Les scénarios avec réchauffement supplémentaire, quant à eux, peuvent être décrits par un certain nombre de métriques (scénarios RCP, SSPx-y, ou niveau de réchauffement global) qui permettent de distinguer plusieurs trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre, notamment des trajectoires envisageant de fortes émissions ou au contraire une décarbonation à l'échelle mondiale.

Ce coût de l'inaction vis-à-vis de l'adaptation pourra alors être comparé aux coûts des solutions d'adaptation envisagées afin d'informer les orientations de long terme exposées dans les PCAET.

Source : Cerema (2021), [Le coût de l'inaction face au changement climatique et à la pollution de l'air. Proposition de méthodologie d'évaluation, rapport d'étude, décembre](#)

³⁸ Voir Dépoues V., Dolques G. et Nicol M. (2022), [Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France. De combien parle-t-on ?](#), étude, I4CE, juin, 66 p.

³⁹ Déploiement de technologies décarbonées par exemple. Cette distinction est à rapprocher de celle que fait le secteur financier entre « risques physiques » et « risques de transition ». Voir Network for Greening the Financial System (2019), [« A call for action Climate change as a source of financial risk – Executive Summary »](#), avril, 8 p.

⁴⁰ Stern N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, Cambridge University Press, 712 p.

2. Impacts directs, interaction entre impacts et risques interrégionaux

Le Giec distingue plus de cent-vingt risques clés liés au changement climatique, répartis en huit catégories : littoraux ; écosystèmes terrestres et océaniques ; infrastructures critiques, réseaux et services ; niveau de vie ; santé humaine ; sécurité alimentaire ; disponibilité de la ressource en eau ; paix et mobilité⁴¹. En France, les rapports à destination des décideurs publics⁴² ont considéré les secteurs suivants, repris dans l'annexe synthétisant la connaissance relative aux impacts du changement climatique : impacts sur l'agriculture et la forêt, sur la ressource en eau, sur les bâtiments, la biodiversité, conséquences sanitaires et économiques des vagues de chaleur et autres événements extrêmes, impacts sur le tourisme, risques littoraux, conséquences sur les infrastructures et la production d'électricité.

Ce choix d'une typologie d'impacts et d'une approche sectorielle pourrait conduire à ignorer les interactions complexes existant entre différents risques. L'estimation des impacts du changement climatique sur le produit intérieur brut (PIB) des États requiert en partie de les modéliser mais demeure partielle. Les approches pour calculer l'impact macroéconomique du changement climatique – qu'elles soient fondées sur l'agrégation des impacts physiques dans chaque secteur économique en silo, sur leur intégration au sein de modèles économiques (par exemple d'équilibre général calculable) ou sur une approche statistique et historique – livrent des résultats très hétérogènes⁴³ : à titre d'illustration, l'OCDE anticipe une baisse du PIB de 0,2 % à l'horizon 2060 pour l'ensemble France, Allemagne, Italie et Royaume-Uni, dans un scénario d'émissions fortes (RCP 8.5) alors que Deloitte prévoit une baisse de 2,2 % en France à l'horizon 2070 dans un scénario d'émissions plus limitées correspondant à la trajectoire actuelle⁴⁴. Avec une approche fondée sur le niveau de réchauffement global (voir *infra*), Swiss-Re anticipe des pertes de PIB en France comprises entre 6,5 % et 13,1 % pour un réchauffement de + 3,2 °C à l'horizon 2050⁴⁵.

Si ces résultats donnent une vision synthétique des conséquences du réchauffement, ils souffrent d'un certain nombre de critiques, liées à la fois aux limites du PIB comme indicateur (qui ne rend pas compte notamment des impacts directs sur la santé ou la biodiversité) et au caractère partiel des canaux d'impacts considérés. Les risques interrégionaux sont en particulier mal pris en compte, notamment ceux de rupture des

⁴¹ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts...*, *op. cit.* (chapitre 16).

⁴² Voir notamment les impacts mentionnés dans : HCC (2021), *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 183 p. ; Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p. ; le *2^e Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2)* ; Dépoues V., Dolques G. et Nicol M. (2022), *Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France. De combien parle-t-on ?*, *op. cit.* ; Comité21 (2022), *Guide sectoriel de l'adaptation aux changements climatiques*, juin, 70 p. Au niveau européen, nous pouvons citer également les programmes de recherche *COACCH* (CO-designing the Assessment of Climate CHange costs) et *Peseta* (Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis), visant tous deux à mieux comprendre les effets et les coûts du changement climatique à l'échelle européenne.

⁴³ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts...*, *op. cit.* (chapitre 16).

⁴⁴ Deloitte (2021), *France's Turning Point. Accelerating New Growth on the Path to Net Zero*, octobre, 40 p.

⁴⁵ Swiss-Re (2021), *The Economics of Climate Change: No Action Not an Option*, avril, 30 p.

chaînes d'approvisionnement qui pourraient toucher l'Europe d'après le Giec⁴⁶ : par exemple, les importations de biens agricoles tropicaux sont particulièrement sensibles au changement climatique. Enfin, au-delà de la difficulté inhérente à modéliser des systèmes loin de leur situation initiale, ces estimations ont pour limite de reposer généralement sur un scénario médian ou jugé le plus probable et ainsi d'ignorer des événements à faible probabilité mais impact potentiellement catastrophique (parfois qualifiés de « cygnes verts »⁴⁷), caractérisés par des points de bascule climatiques⁴⁸, financiers, sociaux ou géopolitiques et des effets de cascade⁴⁹.

3. Intérêt d'une approche en scénario témoin et scénarios de réchauffement

Pour estimer les coûts du changement climatique en isolant les effets, il faut comparer plusieurs scénarios : un scénario dit « témoin » (i.e. sans réchauffement supplémentaire) et un ou plusieurs scénarios liés à un niveau de réchauffement supplémentaire. La prise en compte du changement climatique dans la deuxième série de scénarios se matérialise d'abord à travers la modification d'indicateurs physiques (températures, précipitations, etc.), qui peuvent être ensuite traduits en termes monétaires, sanitaires, etc.

D'une part, établir le scénario témoin revient à envisager l'évolution du monde à climat constant actuel. L'approche proposée par le Giec est de considérer plusieurs trajectoires rendant compte de l'incertitude intrinsèque quant aux dynamiques socioéconomiques mondiales, indépendamment des effets du changement climatique. Ce sont les cinq trajectoires socioéconomiques partagées – les *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs)⁵⁰. Chacune propose des trajectoires économiques (PIB nationaux, évolution du commerce international) et démographiques (population territorialisée, niveau d'urbanisation, etc.) à une échelle agrégée. Des études d'impact sectorielles et locales peuvent cependant nécessiter des projections plus fines, ou portant sur d'autres variables.

D'autre part, plusieurs conventions ont été successivement utilisées par le Giec pour décrire différents scénarios de réchauffement futurs. Ces différents scénarios tiennent

⁴⁶ Conséquences induites dans une région du monde d'impacts physiques ayant lieu dans d'autres régions, tels que les risques sur les chaînes d'approvisionnement, le système financier, les épidémies ou les migrations. Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts...*, op. cit. (chapitre 13 et encadré INTEREG du chapitre 16).

⁴⁷ Banque de France (2020), « Le "Cygne vert" : les banques centrales à l'ère du risque climatique », *Le Bulletin de la Banque de France*, n° 229, juin, 15 p.

⁴⁸ Par exemple, le dépérissement de la forêt amazonienne, le ralentissement du Gulf Stream (AMOC), la désintégration des calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland ou encore la disparition du pergélisol. Voir Giec (2021), *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe I, août (chapitre 4).

⁴⁹ Voir Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts...*, op. cit. (chapitre 16) ou Kemp L., Xu C., Depledge J. et al. (2022), « *Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios* », *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 119(34), août.

⁵⁰ Les cinq SSP définis par le Giec sont : Durabilité (SSP1), Milieu de la route (SSP2), Rivalités régionales (SSP3), Inégalités (SSP4) et Développement fossile (SSP5). Ils se différencient par un ensemble d'hypothèses portant notamment sur le développement, l'évolution des inégalités inter et intra-nationales, des cadres institutionnels ou encore du commerce international. Voir O'Neill B. C., Kriegler E., Ebi K. L. et al. (2017), « *The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century* », *Global Environmental Change*, n° 42, janvier, p. 169-180.

compte notamment de l'incertitude sur les futures émissions de gaz à effet de serre et de leurs conséquences sur le niveau de réchauffement global. Le cinquième rapport du Giec s'appuyait sur quatre scénarios définissant des trajectoires d'émissions et un niveau de forçage radiatif⁵¹ à l'horizon 2100, les *Representative Concentration Pathways* (RCPs) : RCP 2.6 (faibles émissions), RCP 4.5, RCP 6.0 (scénarios intermédiaires) et RCP 8.5 (émissions fortes)⁵². Ces scénarios ont été largement utilisés comme références dans la littérature sur les effets du changement climatique ces dernières années, en particulier le scénario le plus pessimiste, RCP 8.5⁵³. Ce dernier peut être considéré comme une borne haute des fenêtres d'incertitude, susceptible de se réaliser par exemple en cas de boucles de rétroaction du carbone plus fortes que prévu⁵⁴, mais pas comme un scénario *business as usual*.

Le sixième rapport du Giec s'articule autour de neuf nouveaux scénarios SSPx-y intégrant les trajectoires socioéconomiques (x) des niveaux de forçage radiatif futurs (y)⁵⁵ et souligne l'intérêt d'une approche en termes de niveau de réchauffement global (tel que + 2 °C ou + 3°), autant à l'échelle mondiale que régionale. Plus que le scénario d'émissions de gaz à effet de serre et l'horizon temporel retenus, c'est bien le niveau de réchauffement global qui conditionne les impacts attendus du changement climatique, la vitesse à laquelle sont atteints les différents niveaux de concentration ne changeant pas la forme ni l'ampleur des impacts qui y sont associés⁵⁶. Cette approche est d'autant plus pertinente que pour chaque trajectoire d'émissions futures, le champ d'incertitude sur la température moyenne globale atteinte est plus ou moins large (Tableau 1).

D'après le Giec, la température mondiale moyenne annuelle de surface a augmenté de 1,09 °C entre les périodes 1850-1900 et 2011-2020, davantage sur les continents (+ 1,59 °C) que dans les océans (+ 0,88 °C)⁵⁷. En France métropolitaine, le niveau de réchauffement moyen serait supérieur à la moyenne mondiale : + 1,5 °C entre la décennie 2012-2021 et la période 1961-1990⁵⁸, + 1,7 °C par rapport à 1900 d'après Météo-France⁵⁹.

⁵¹ Le Giec définit le « forçage radiatif » comme la variation du flux radiatif net au sommet de l'atmosphère (exprimé en W/m²) due à la modification de facteurs externes tels que la concentration en dioxyde de carbone atmosphérique, la concentration en aérosols d'origine volcanique ou le rayonnement solaire. Voir Giec (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.* (Glossaire).

⁵² Giec (2014), *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*, cinquième rapport du Giec, contribution du groupe I. Le nombre suivant le sigle RCP correspond au forçage radiatif à l'horizon 2100 de la trajectoire désignée (en W/m²).

⁵³ Le scénario RCP 8.5 est fréquemment utilisé dans les références ayant servi à établir la revue de littérature présentée dans le chapitre 2.

⁵⁴ Voir Hausfather Z. (2019), « [Explainer: The high-emissions "RCP8.5" global warming scenario](#) », *CarbonBrief.org*, article du 21 août ; Giec (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.* (chapitre 1) ; et Giec (2022), *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change*, sixième rapport du Giec, contribution du groupe III, avril (chapitre 3).

⁵⁵ Voir Giec (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.* (chapitre 1), ou Vailles C. (2021), « [D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du Giec ?](#) », I4CE, Billet d'analyse, septembre.

⁵⁶ Giec (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.* Seuls certains impacts aux dynamiques temporelles plus lentes sortent de ce cadre (montée du niveau des mers, par exemple).

⁵⁷ Giec (2021), *Climate Change 2021...*, *op. cit.* (chapitre 2).

⁵⁸ Ministère de la Transition écologique (2022), « [Chiffres clés du climat. France, Europe et Monde – édition décembre 2022](#) », *Datalab – Climat*, d'après des données de Météo France, décembre, 106 p.

⁵⁹ Météo-France (2020), « [Le changement climatique en France](#) », 28 février.

Selon une étude récente⁶⁰, il s'élève déjà à + 1,66 °C par rapport à la période 1900-1930 et atteindrait, à l'horizon 2100, + 3,8 °C dans le scénario SSP2-4.5 (contre 2,7 °C au niveau mondial) et + 6,7 °C dans le scénario SSP5-8.5 (contre 4,4 °C au niveau mondial)⁶¹. Afin de faciliter la traduction entre trajectoires d'émissions et niveau de réchauffement dans le contexte national, un tableau analogue au tableau 1 pourrait être produit au niveau de la France métropolitaine.

Tableau 1 – Niveaux de réchauffement moyen par rapport à la période 1850-1900 correspondant aux combinaisons entre trajectoires socioéconomiques et trajectoires d'émissions à différents horizons temporels

Scénario	Court terme 2021-2040		Moyen terme 2041-2060		Long terme 2081-2100	
	Meilleure estimation (°C)	Intervalle « hautement probable » (°C)	Meilleure estimation (°C)	Intervalle « hautement probable » (°C)	Meilleure estimation (°C)	Intervalle « hautement probable » (°C)
SSP1-1.9	1,5	1,2 à 1,7	1,6	1,2 à 2	1,4	1,0 à 1,8
SSP1-2.6	1,5	1,2 à 1,8	1,7	1,3 à 2,2	1,8	1,3 à 2,4
SSP2-4.5	1,5	1,2 à 1,8	2	1,6 à 2,5	2,7	2,1 à 3,5
SSP3-7.0	1,5	1,2 à 1,8	2,1	1,7 à 2,6	3,6	2,8 à 4,6
SSP5-8.5	1,6	1,3 à 1,9	2,4	1,9 à 3	4,4	3,3 à 5,7

Lecture : à moyen terme (2041-2060), dans un scénario correspondant à la trajectoire SSP2-4.5, le réchauffement moyen à l'échelle mondiale devrait atteindre + 2 °C, par rapport à la période 1850-1900.

Source : Giec (2021), *Climate Change 2021. The Physical Science Basis* (Résumé pour décideurs).

4. Passer des trajectoires d'émissions aux indicateurs physiques et aux indicateurs socioéconomiques

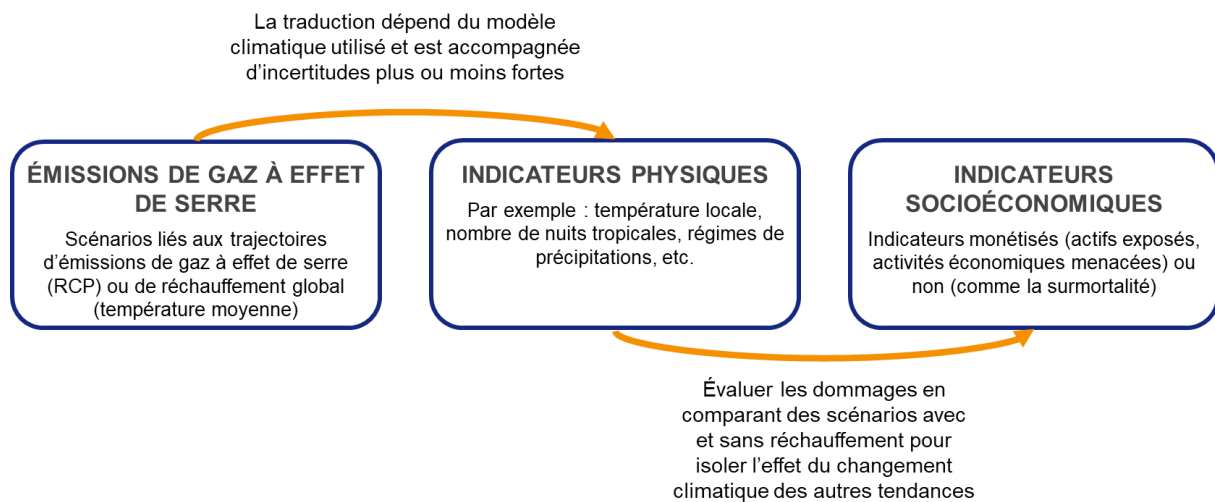
On peut schématiquement représenter l'évaluation d'un impact du changement climatique comme une chaîne de modélisation passant des émissions de gaz à effet de serre aux indicateurs physiques pour aboutir à des indicateurs socioéconomiques (Figure 1). Le passage des trajectoires d'émissions à des indicateurs physiques (température moyenne, nombre de nuits tropicales, etc.) est sujet à un certain nombre d'incertitudes inhérentes aux modèles climatiques utilisés.

⁶⁰ Ribes A., Boé J., Qasmi S., Dubousson B., Douville H. et Terray L. (2022), « [An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint](#) », *Earth System Dynamics*, vol. 13(4), octobre, p. 1397-1415.

⁶¹ L'utilisation de périodes de référence différentes (1850-1900 pour le Giec et ici 1900 et 1900-1930 pour les projections nationales) complique la comparaison.

Au niveau français, l'outil Drias⁶² met à disposition des décideurs publics les projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM⁶³). Le passage des indicateurs physiques aux indicateurs de biodiversité reste très lacunaire. L'évaluation, ensuite, des conséquences socioéconomiques du changement climatique requiert une estimation de la vulnérabilité et de la valeur future des actifs et activités économiques exposés⁶⁴. L'estimation des coûts est d'autant plus compliquée que les conséquences de chaque aléa physique peuvent être de nature diverse : ainsi, des pluies intenses peuvent à la fois générer une inondation par débordement (et donc endommager des infrastructures), mais également engendrer des pertes d'exploitation (par exemple, les voies ferroviaires bloquées), qui se répercutent ensuite sur un large spectre d'acteurs économiques.

Figure 1 – Différents niveaux de description des impacts du changement climatique sur la société



Lecture : la hausse de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère engendre des impacts physiques comme la hausse des températures qui est responsable par exemple de surmortalité lors des périodes de canicules estivales.

Source : France Stratégie

⁶² Voir <http://www.drias-climat.fr/>.

⁶³ L'Institut Pierre-Simon Laplace, le Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique, et le Centre national de recherches météorologiques.

⁶⁴ Voir notamment Piontek F., Drouet L., Emmerling J. *et al.* (2021), « Integrated perspective on translating biophysical to economic impacts of climate change », *Nature Climate Change*, vol. 11, juin, p. 563-572.

Chapitre 2

Estimation des impacts attendus en France dans les principaux domaines affectés par le changement climatique

Le dernier exercice de synthèse des impacts du changement climatique à l'échelle française a été réalisé par l'Onerc en 2009. Les impacts y étaient décrits qualitativement et plusieurs éléments quantitatifs étaient mis en avant, principalement vis-à-vis de la tension sur la ressource en eau, des enjeux assurantiels, agricoles, énergétiques, d'infrastructures et de tourisme. Sur chacun de ces sujets, la connaissance a progressé : des projets de modélisation ont été entrepris (Climator en agriculture, Explore 2070 pour la disponibilité de l'eau) et des estimations nouvelles ont actualisé les données disponibles (assurances, infrastructures, production électrique).

On donne ici les principaux résultats des études institutionnelles existantes sur les coûts de l'inaction climatique dans différents domaines⁶⁵. Les dommages décrits sont de diverses natures : ressources naturelles (eau, forêt, biodiversité), actifs économiques (bâtiments, infrastructures), secteurs d'activité (agriculture, électricité, tourisme) ou impacts humains directs (santé, productivité du travail). Ces derniers ne couvrent pas de manière exhaustive l'ensemble des dommages potentiels, peuvent se recouper et sont établis à partir de méthodologies et de scénarios de réchauffement parfois très différents, ce qui limite leur comparabilité. De plus, les coûts de l'inaction étant parfois donnés par les coûts de l'adaptation spontanée des agents, la frontière entre les deux notions ne peut pas toujours être clairement explicitée.

⁶⁵ Toutes les références bibliographiques par secteur sont rassemblées dans la bibliographie de ce document de travail.

1. Ressource en eau

D'après l'édition 2020 des [Chiffres clés sur l'eau et les milieux aquatiques](#), les prélèvements d'eau tendent à diminuer depuis le début des années 2000, sauf pour les besoins de l'agriculture. Les évaluations indiquent que 89 % des masses d'eau souterraine sont dans un bon état quantitatif en 2015 comme en 2009, au sens de la directive-cadre sur l'eau. Néanmoins, des restrictions d'eau sont appliquées sur au moins 30 % de la métropole chaque année depuis 2017, ce qui souligne une situation déjà tendue dans certains territoires. Cela peut s'expliquer par le fait que la ressource en eau renouvelable⁶⁶ a diminué de 14 % entre 1990-2001 et 2002-2018, passant de 229 à 197 milliards de mètres cubes en moyenne annuelle⁶⁷. La sécheresse que traverse la France depuis 2022 en est une bonne illustration. Ayant débuté précocement dès le printemps, la quasi-totalité des départements de métropole ont connu des restrictions d'eau durant l'été. En décembre, 48 étaient encore concernés (dont 23 en niveau de crise).

Projections des effets du changement climatique sur la ressource en eau

Au niveau européen, le programme de recherche Peseta IV⁶⁸ a évalué à 65 millions d'individus la population qui serait exposée à des restrictions d'eau à + 3 °C (contre 52 millions de personnes aujourd'hui). Par ailleurs, la population exposée à des restrictions sévères, c'est-à-dire 3,3 millions de personnes aujourd'hui, pourrait être multipliée par quatre. Même si ces conséquences affectent principalement le sud de l'Europe, le changement climatique conduira à l'émergence de nouvelles zones de stress hydrique dans des pays tels que la Bulgarie, la Roumanie, la France, la Belgique, les Pays-Bas, l'Allemagne ou le Danemark.

Par ailleurs, plusieurs exercices prospectifs nationaux ont entrepris de donner plus de visibilité aux pouvoirs publics sur l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau dans les décennies à venir⁶⁹ :

- selon le programme ClimSec⁷⁰, un paradoxe pourrait se développer dans les années à venir, conjuguant de fortes tensions sur les ressources en eau malgré un niveau global des précipitations qui est et restera considérable en France. Cela s'explique par la non-coïncidence spatiale, et surtout temporelle, entre les besoins en eau et les ressources hydriques. Il ne pleuvra pas forcément où et quand le besoin d'eau sera le plus important. En particulier, les besoins sont sensiblement plus forts en été alors que la ressource est relativement plus abondante en hiver ;

⁶⁶ C'est-à-dire l'apport annuel d'eau douce sur le territoire national à travers les cours d'eau et les précipitations qui ne retournent pas à l'atmosphère par évaporation ou transpiration des végétaux et qui rejoignent les eaux superficielles et souterraines.

⁶⁷ Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022), « [Évolutions de la ressource en eau renouvelable en France métropolitaine de 1990 à 2018](#) », *Datalab – Environnement*, juin, 64 p.

⁶⁸ *Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis*. Voir JRC (2020), [Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report](#), Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.

⁶⁹ Sénat (2019), [Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée](#), rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

⁷⁰ Météo-France (2011), [Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol](#), rapport final, mai, 72 p.

- le projet Explore 2070⁷¹ – qui porte sur la France métropolitaine –, dont la mise à jour « Explore 2 » est actuellement en cours, met en avant les résultats suivants pour la période 2046-2065 relativement à la période 1961-1990, sous un scénario climatique RCP 6.0⁷² :
 - la recharge des nappes baissera significativement (Carte 1). Les résultats sont assez différents selon les régions, mais ils ne sont positifs quasiment nulle part. La baisse moyenne de la recharge pour la France dans son ensemble sera de 10 % à 25 %. Elle sera particulièrement marquée pour le bassin de la Loire, où elle atteindra 25 % à 30 %, et pour le Sud-Ouest (- 30 % à - 50 %). La région Occitanie sera particulièrement touchée,
 - pour une majorité de points de mesure, le débit annuel moyen des cours d'eau pourrait baisser de l'ordre de 10 % à 40 %. Les modèles projettent une diminution particulièrement marquée du débit moyen annuel pour les cours d'eau des contreforts pyrénéens et, dans une moindre mesure, de la majorité du bassin hydrographique Seine-Normandie, avec des diminutions simulées comprises entre 10 % et 60 %,
 - les débits d'étiage seront par ailleurs plus sévères, plus longs et plus précoces, avec des débits estivaux réduits de 30 % à 60 %. Ainsi, le Rhône à Beaucaire pourrait subir une baisse du débit minimum mensuel quinquennal jusqu'à 50 %. Pour la Seine, on s'attend à une baisse du débit moyen annuel à Paris comprise entre 10 % et 50 %, mais à un recul du débit minimal mensuel quinquennal pouvant atteindre jusqu'à 70 %,
 - enfin, même si le phénomène est complexe à analyser et mesurer, il semblerait que l'évapotranspiration va s'intensifier dans les prochaines décennies, aboutissant à retenir dans les sols superficiels une part plus importante des précipitations, au détriment de l'alimentation des nappes.

De nombreux secteurs économiques consommateurs d'eau pourraient subir des pertes économiques en situation de restriction de l'accès à la ressource, en particulier ceux de l'énergie (barrages hydroélectriques, refroidissement des centrales thermiques ou nucléaires – voir la fiche « [Énergie](#) »), de l'agriculture (manque d'eau pour l'irrigation – voir la fiche « [Agriculture](#) »), du tourisme (lacs, activités nautiques), ou les industries très consommatrices d'eau (aciérie ou chimie, par exemple).

Explore 2070 propose des comparaisons spatialisées entre l'offre et la demande en eau à l'horizon 2070 sous divers scénarios (1) d'évolution socioéconomique (notamment d'étalement urbain) et (2) de choix d'adaptation (notamment en matière d'agriculture)⁷³.

⁷¹ Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'Énergie (2012), « [Explore 2070](#) ». Les plans d'adaptation au changement climatique des différents bassins ont été fondés sur les perspectives issues d'Explore 2070 : notamment « [Garonne 2050](#) » (2014) et « [Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050](#) » (2014). [Explore 2](#) (2021-2024) doit prendre la suite d'Explore 2070, avec pour but de produire, d'ici 2023, de nouvelles projections hydroclimatiques pour le territoire métropolitain sur la base des résultats du Giec (CMIP5). Par ailleurs, le projet OneWater (2022-2031) est un « Programme et équipement prioritaire de recherche exploratoire » du quatrième Programme d'investissements d'avenir (PIA 4), visant essentiellement à anticiper l'évolution de la ressource en eau pour permettre l'adaptation des territoires à leurs singularités.

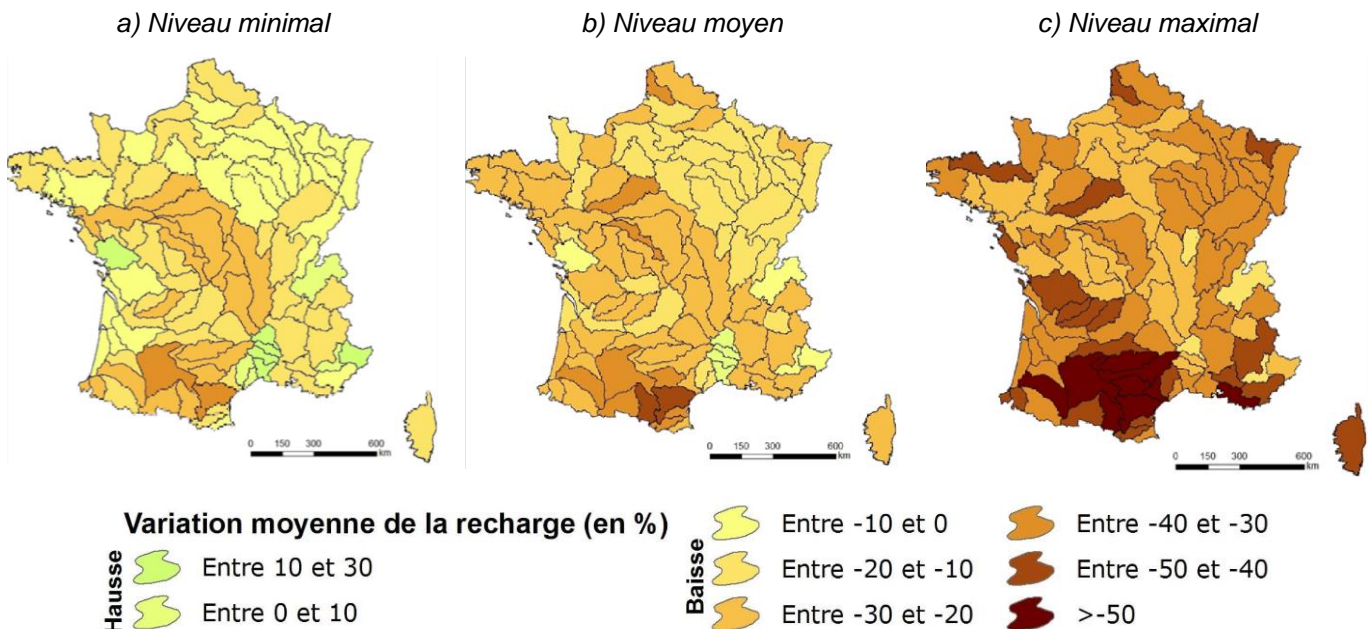
⁷² Plus précisément, Explore 2070 utilise les scénarios SRES, ancêtres des scénarios RCP, et privilégie le scénario A1B, qui correspond au RCP 6.0.

⁷³ Les résultats portent sur la métropole. Voir Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2013), « [Bilan du projet Explore 2070 – Résultats et premiers enseignements](#) », diaporama, 48 p.

Une quantification du déséquilibre à l'horizon 2070 est proposée pour une année sèche à fréquence quinquennale :

- étant donné l'ordre de priorité sur les usages de l'eau retenu pour le projet, l'alimentation en eau potable ne rencontre pas de difficulté ;
- une tension apparaît sur le secteur de l'énergie nucléaire⁷⁴ : de 1,78 % à 10,11 % des besoins non satisfaits en 2070⁷⁵, contre 0 % en 2006⁷⁶ ;
- pour le secteur agricole, en scénario tendanciel, le déficit de l'offre passe de - 9,82 % en 2006 à autour de - 23 % de la demande. Cette évolution est davantage contenue dans des scénarios où une politique d'adaptation est menée ;
- les tensions rencontrées dans le secteur de l'industrie sont moindres : autour de 2,8 % des besoins seraient non satisfaits, contre 0,31 % en 2006.

Carte 1 – Variation moyenne de la recharge des nappes phréatiques entre la période actuelle (1961-1990) et la période future (2046-2065)



Lecture : le niveau moyen de la recharge des nappes (Carte 1b, au centre) va baisser sur la quasi-totalité du territoire et de manière importante à l'ouest du pourtour méditerranéen.

Source : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (2012), « [Explore 2070. Hydrologie souterraine – synthèse](#) », octobre, 184 p., [ici p. 4](#)

⁷⁴ Les auteurs ont choisi de rattacher les chiffres liés à la production d'énergie d'origine non nucléaire au secteur de l'industrie.

⁷⁵ La fourchette haute du déficit relatif dans le secteur nucléaire se produit en cas de diminution importante de la consommation en eau du secteur (de 15 958 millions de mètres cubes d'eau à 2 611 ou 1 609 millions de mètres cubes), due à la fermeture de certains sites et à la construction de nouvelles centrales avec un circuit de refroidissement fermé, à besoins insatisfaits constants. La fourchette basse correspond à un tendanciel à consommation constante.

⁷⁶ Ce résultat peut être mis en regard des conclusions de RTE, à l'horizon 2050, sur la sensibilité du parc nucléaire aux épisodes de sécheresse intense. Voir la fiche « [Énergie](#) ».

À titre de comparaison, l'Onerc avançait en 2009 que le déficit à l'horizon 2050 serait de l'ordre de 2 milliards de mètres cubes d'eau⁷⁷.

Si ces chiffrages agrégés au niveau national permettent de donner un ordre de grandeur du phénomène, ils restent insuffisants car ils ne tiennent pas compte du fait que l'équilibre offre-demande en eau est essentiellement local.

Enfin, aucune estimation quantitative de coûts induits par les déséquilibres entre l'offre et la demande anticipés n'est proposée dans Explore 2070, à la fois au regard du caractère local de l'équilibre offre-demande et des incertitudes (modèles hydrologiques, choix politiques et techniques). Les auteurs soulignent que les incertitudes inhérentes à ces chiffres (scénarios choisis, modèles utilisés, données historiques, choix politiques et technologiques futurs) font qu'ils ne peuvent être appréhendés que de façon globale et qualitative. Pour rappel, en 2009, l'Onerc évaluait que les coûts engendrés par le déficit en eau se situeraient entre 5 et 10 milliards d'euros.

⁷⁷ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p. En 2019, le volume total d'eau douce prélevé s'élève à 31,4 milliards de mètres cubes pour la France métropolitaine, voir CGDD (2022), « [Les prélèvements d'eau douce par usages et par ressources](#) », Commissariat général au développement durable, octobre.

2. Agriculture

Des effets du changement climatique déjà observables sur la production agricole

Le secteur agricole est, au niveau mondial, l'un des secteurs économiques les plus sensibles au changement climatique et ses effets sont déjà visibles. Selon l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae), le climat serait responsable de 30 % à 70 % de la stagnation, déjà observée aujourd'hui, du niveau de rendement du blé en France, l'autre grande cause étant une baisse de la fourniture d'azote, liée aux économies d'intrants et à la diminution des légumineuses en tant que précédent cultural⁷⁸. Un certain nombre de filières et de territoires voient leurs rendements diminuer et le manque d'eau a en particulier déjà des conséquences visibles⁷⁹ :

- dans le Languedoc, le passage progressif à un climat méditerranéen semi-aride s'est accompagné en trente ans d'un recul de la production agricole estimée par l'Inrae à 0,9 tonne de matière sèche par hectare, soit une perte de 11 % ;
- les viticulteurs font face depuis 2010 à des millésimes avec un fort déficit hydrique une année sur deux, ce qui se traduit, ces années-là, par des baisses de production de 20 %. Pour la seule année 2016, la perte de production viticole pour cause de sécheresse et défaut d'irrigation est estimée à 133 millions d'euros ;
- en Lozère, le passage d'un climat tempéré humide à un climat méditerranéen s'est traduit, en trente ans, par une perte de production fourragère moyenne de 11 % ;
- dans la Drôme, à Valence, la température de mai à août s'est accrue de 2,5 °C en trente ans et l'évapotranspiration de 25 %, créant un besoin accru d'irrigation. Ainsi, le maïs qui se cultivait avec un apport par irrigation de 2 000 mètres cubes d'eau par hectare et par an en nécessite aujourd'hui 3 000. Dans le même temps, les autorités sont conduites à imposer des réductions de prélèvements sur les trois cours d'eau (Rhône, Isère et Bourne) d'où provient 72 % de l'eau prélevée. Ainsi, entre 2000 et 2010, malgré un besoin accru d'irrigation, la surface irrigable a baissé de 16 % et la surface irriguée de 7 % dans la Drôme ;
- l'Inrae a évalué les effets de la réduction de 40 % des volumes prélevables pour la période de juin à septembre pour la Drôme des collines : perte de 12 000 tonnes (- 28 %) et jusqu'à 19 000 tonnes (- 47 %) en année sèche pour le maïs et perte de 5 000 tonnes (- 10 %) et jusqu'à 8 000 tonnes (- 17 %) en année sèche pour l'abricot.

⁷⁸ Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F. X. et Huard F. (2010), « [Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France](#) », *Field Crops Research*, vol. 119(1), octobre, p. 201-212, rapporté par Inrae (2020), « [Blé tendre et sécheresse : de nouvelles variétés à venir](#) ».

⁷⁹ CGAAER (2017), *Eau, agriculture et changement climatique. Statu quo ou anticipation ? Synthèse et recommandations*, Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux, rapport n° 16072, juin, 66 p., rapporté par le Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

Au-delà de ces événements liés aux sécheresses et au manque d'eau, le changement climatique induit déjà des floraisons plus précoces au printemps, à une période où les risques de gelée sont encore importants : le Haut Conseil pour le climat (HCC)⁸⁰ rapporte que ces risques ont abouti en 2016 ou en 2021 à de fortes chutes de rendement (par exemple, - 40 % de la production d'abricots en 2021 par rapport à 2020).

Les impacts anticipés du changement climatique sur l'agriculture

Au niveau européen, le programme COACCH⁸¹ anticipe en moyenne une augmentation de la productivité des cultures, tout en soulignant une grande hétérogénéité entre les types de culture, et entre les différents lieux géographiques en Europe : le maïs apparaît plus vulnérable que le blé et la production agricole pourrait tendre à se localiser plus au nord de l'Europe qu'aujourd'hui. Le programme de recherche Peseta IV⁸² souligne également la vulnérabilité des cultures de maïs dans le sud de l'Europe, en particulier dans les zones où une contrainte sur la ressource en eau va apparaître ou se renforcer. En revanche, le rendement du blé pourrait s'accroître de 5 % en moyenne dans le nord de l'Europe, mais se réduire de 12 % dans le sud de l'Europe dans un scénario à + 2 °C, du fait de la diminution des précipitations (notamment en période estivale) et de l'effet limité de la concentration de CO₂. Les auteurs soulignent néanmoins le fait que les projections climatiques établissent que l'Europe pourrait bénéficier d'un avantage comparatif climatique dans le secteur de l'agriculture vis-à-vis d'autres régions du monde où les impacts pourraient être plus délétères.

Un rapport commun du CGEDD et du CGAAER de 2020⁸³ propose une synthèse de la littérature des impacts du changement climatique sur l'agriculture. Les impacts physiques sont nombreux et leurs interactions avec les systèmes agricoles sont complexes : les productions agricoles sont directement sensibles aux températures, le besoin en eau des plantes est menacé par l'évolution des précipitations et de l'évapotranspiration (notamment dans le Sud-Ouest), les sols ont tendance à se dégrader et des pathogènes et ravageurs de cultures auparavant non endémiques pourraient émerger⁸⁴. À cela s'ajoute l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes : sécheresses, vagues de chaleur ou de froid. À titre d'exemple, des projections d'impacts sur les rendements des prairies, du blé tendre et de l'orge des épisodes de sécheresse ont été réalisées par la Caisse centrale de réassurance (CCR) en collaboration avec Météo-France à partir du modèle Arpège-Climat⁸⁵ (Tableau 2).

⁸⁰ Agreste (2021), « [Abricot 1/4 – En 2021, le gel historique d'avril ampute fortement la production d'abricots](#) », *Agreste Conjoncture*, n° 2021-052, mai, 4 p., rapporté par HCC (2021), [Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation](#), Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 183 p.

⁸¹ COACCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.

⁸² JRC (2020), [Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report](#), Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.

⁸³ Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), aujourd'hui renommé Inspection générale de l'environnement et du développement durable (IGEDD) et Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER). CGAAER et CGEDD (2020), [Changement climatique, eau, agriculture. Quelles trajectoires d'ici 2050 ?](#), rapport, juillet, 333 p.

⁸⁴ Sur ce dernier point, le rapport précise néanmoins que « la diversité des productions végétales combinée à celle des bioagresseurs ne permet cependant pas d'apporter de réponse générale (Climator montre des diminutions de septoriose et de rouille sur le blé, par exemple) ». Néanmoins, la perte de biodiversité peut accroître la fragilité des agroécosystèmes à la survenue de nouveaux pathogènes : voir FAO (2019), [State of the World Biodiversity for Food and Agriculture](#), Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 572 p.

⁸⁵ Onerc (2022), [La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 385 p.

À l'échelle française, le projet Climator⁸⁶ présente une simulation des impacts du changement climatique sur les principales espèces en plusieurs points du territoire métropolitain entre 2007 et 2010. Les résultats sont fondés sur de multiples scénarios climatiques⁸⁷ mais donnent un caractère central au scénario RCP 6.0. Des voies d'adaptation sont également investiguées. À titre d'illustration, la culture du maïs apparaît comme très défavorisée par le changement climatique, en particulier dans les zones actuelles de production : des baisses de rendement de 0,5 à 1 t/ha (- 5,7 % à - 11,4 %) sont anticipées en moyenne sur la période 2020-2050, et peuvent atteindre - 1,5 t/ha (- 17 %) sur la période 2070-2100⁸⁸. Néanmoins, ces résultats sont donnés en supposant que le déficit hydrique futur sera compensé par davantage d'irrigation, à hauteur de 40 mm/an supplémentaires en moyenne pour la seule culture du maïs. Cela peut apparaître comme optimiste, étant donné l'impact du changement climatique sur la ressource en eau (voir la fiche « [Ressource en eau](#) »).

Tableau 2 – Pertes de récoltes décennales dues aux sécheresses aujourd'hui et en 2050 dans le cas du scénario RCP 8.5

	Pertes de récoltes décennales liées aux sécheresses	
	Climat actuel	Climat 2050 (RCP 8.5)
Prairies	- 18,5 %	- 25,0 %
Blé tendre d'hiver	- 4,2 %	- 7,4 %
Orge d'hiver	- 5,3 %	- 9,5 %

Lecture : à l'horizon 2050, dans le cas d'une trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre correspondant au scénario RCP 8.5 (i.e. un réchauffement climatique important), les pertes de récoltes décennales pourraient atteindre presque 10 % pour l'orge d'hiver à cause des sécheresses contre 5 % aujourd'hui.

Source : Onerc (2022), « [La prospective au service de l'adaptation au changement climatique](#) », à partir de données CCR – Météo-France

À l'inverse, la culture du blé tendre pourrait bénéficier d'une augmentation de rendement de l'ordre de 0,9 t/ha (+ 13 %) entre 2020 et 2050 à 1 t/ha (+ 14,5 %) entre 2070 et 2100 en moyenne, notamment en raison de l'effet d'accroissement du CO₂, accompagné toutefois d'une plus grande variabilité interannuelle. Ce résultat contraste cependant avec l'attribution partielle de la stagnation des rendements du blé au changement climatique présentée *supra*. De plus, il a évolué depuis la revue de l'Onerc en 2009 : il était alors anticipé une hausse à court terme des rendements du blé et du maïs, mais un rendement négatif à l'horizon 2100 du fait de l'évolution des températures et des précipitations⁸⁹. D'une manière globale, les effets du changement climatique sur l'agriculture seront hétérogènes spatialement comme indiqué sur la Carte 2, ce qui pose la question de la possibilité de relocalisation des cultures en vue de diminuer les pertes de rendement.

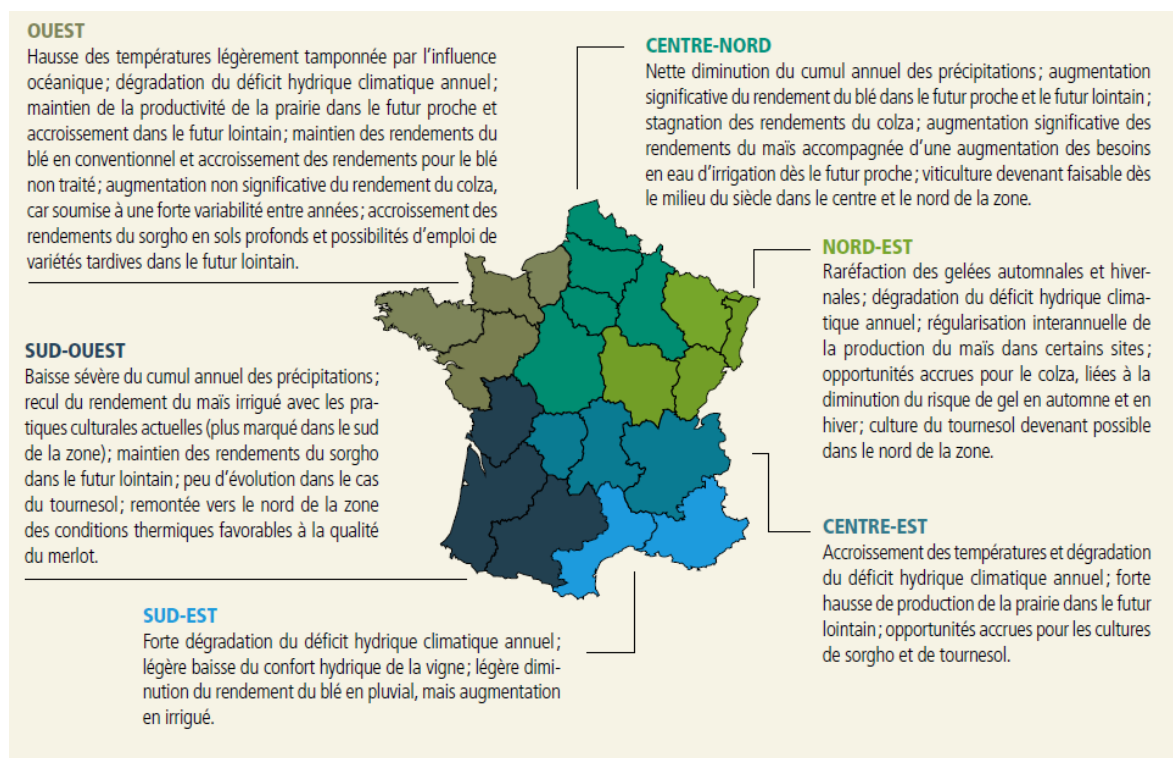
⁸⁶ Ademe (2012), [Livre Vert du projet Climator \(2007-2010\). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces](#), 334 p.

⁸⁷ Plus précisément, Climator utilise les scénarios SRES, ancêtres des scénarios RCP, et privilégie le scénario A1B, qui correspond au RCP 6.0.

⁸⁸ Sur la période 2016-2020, les rendements moyens du blé tendre et du maïs ont été respectivement de 6,89 t/ha et 8,75 t/ha ([données Agreste](#)).

⁸⁹ Pour le maïs, cela se traduirait par une perte de 113 millions d'euros par an en 2100 (sans prendre en compte l'effet des sécheresses ou de la disponibilité en eau). L'effet sécheresse pourrait alors à lui seul coûter 300 millions d'euros par an en 2100 selon le scénario A2 (semblable au RCP 8.5). Onerc (2009), [Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation](#), Paris, La Documentation française, 194 p.

Carte 2 – Conclusions principales du projet Climator par zone géographique métropolitaine, autour du scénario RCP 6.0



Source : Réseau Action Climat (2014), *Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Recueil d'expériences territoriales*, septembre, 58 p., ici p. 11 ; repris par Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective*, mai, 190 p.

Une projection multi-espèces, territorialisée à l'échelle de la ferme France, a été réalisée par l'association Solagro à partir des données Climator dans le cadre de l'élaboration du modèle intégré du système agricole français MoSUT. Ce modèle a servi à produire Afterres2050⁹⁰, une projection à l'horizon 2050 de la ferme France, et à la mise en place du portail Canari⁹¹, qui a pour but de mettre à disposition des acteurs du secteur des projections locales territorialisées à un horizon proche (2020-2050) et lointain (2050-2100) d'indicateurs agroclimatiques, qui comprennent à la fois des indicateurs bioclimatiques généraux et des indicateurs spécifiques à de nombreuses cultures ou filières. Au-delà de l'exercice multi-espèces, plusieurs filières se sont engagées dans des travaux pour comprendre comment le

⁹⁰ Voir <https://afterres2050.solagro.org/>. D'autres exercices de projection de la ferme France ne prennent pas explicitement en considération l'impact du changement climatique sur le secteur : par exemple, le scénario « Ten Years For Agroecology in Europe », développé par l'Iddri, part de l'hypothèse que la productivité de l'agroécologie aura le même niveau en 2050 et aujourd'hui car « les gains liés à l'innovation en agroécologie des prochaines décennies viendraient tout juste compenser les pertes liées aux impacts du changement climatique » (voir Iddri [2018], « Une Europe agroécologique en 2050 : une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine », *Study*, n° 09/18, septembre, 77 p., ici p. 37). En général, Duru *et al.* (2021) remarquent que : « L'impact du changement climatique sur les rendements [dans les différents scénarios de prospective alimentaire] est rarement spécifié ; on en déduit qu'il est rarement pris en compte » (voir Duru M., Aubert P. M., Couturier C. et Doublet S. [2021], « Scénarios de systèmes alimentaires à l'horizon 2050 au niveau européen et français : quels éclairages pour les politiques publiques ? », *Revue AE&S*, vol. 11(1), juin, p. 38-57).

⁹¹ Voir <https://canari-agri.fr/indicateurs>.

changement climatique allait les affecter⁹² : se sont par exemple mobilisées la filière viticole (projet Laccave) ou celle du lait (projet Climalait).

Pour finir, le CGAAER, dans une publication d'avril 2022⁹³, souligne la difficulté à évaluer de manière exhaustive les coûts à la fois liés aux impacts et à l'adaptation du secteur agricole, au regard des déterminants multiformes du système de production et du lien étroit des couples filière-territoire. À l'aide notamment des contributions des filières agricoles au Varenne de l'eau et de l'adaptation au changement climatique et des travaux conduits par les chambres d'agriculture régionales en vue des diagnostics territoriaux⁹⁴, les auteurs fournissent une analyse qualitative des conséquences du réchauffement sur plusieurs couples filière-territoire. Ils estiment à titre de tendance un ordre de grandeur des surcoûts liés à l'augmentation des aléas climatiques à hauteur de un milliard d'euros par an, sous l'hypothèse d'un doublement à l'horizon 2050 des aléas actuels (soit 2,5 % des 40 milliards d'euros de la production végétale française actuelle)⁹⁵.

Les auteurs évaluent en parallèle les coûts de l'adaptation liés à l'accroissement de l'usage de l'irrigation à un milliard d'euros par an (investissement dans les nouveaux dispositifs de stockage et dans le matériel d'irrigation sur les exploitations, sous l'hypothèse d'un doublement des volumes d'eau prélevés pour l'irrigation). Un enjeu de massification du conseil climatique auprès des exploitants est également identifié, dont le coût est évalué à 150 millions d'euros par an, et un coût de renouvellement du verger français, lorsqu'il est inadapté au climat futur, estimé à 600 millions d'euros par an (10 % du verger par an). De manière agrégée, cela signifie que les impacts et les solutions d'adaptation considérés dans ce travail représenteraient de l'ordre de 3 milliards d'euros par an. Cette première analyse pourrait être complétée à l'avenir par des chiffrages territoriaux, eu égard aux spécificités locales des filières et des territoires, mais également à l'interaction avec d'autres enjeux (notamment la gestion de l'eau et les conséquences sur la biodiversité).

⁹² Onerc (2022), *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 385 p.

⁹³ CGAAER (2022), *Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires*, rapport n° 21044, avril, 117 p.

⁹⁴ Voir annexes de CGAAER (2022), *Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires*, rapport n° 21044, avril, 117 p.

⁹⁵ Cette estimation ne repose pas explicitement sur une projection à climat futur.

3. Forêt

D'après l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), la surface de la forêt française a augmenté de 21 % depuis 1985 et la productivité biologique nette, c'est-à-dire la croissance des arbres déduite de la mortalité, a décliné de 10 % en une décennie, passant de 5,3 à 4,8 mètres cubes par hectare et par an. En particulier, la mortalité atteint désormais 0,4 % du volume de bois vivant, soit une augmentation de 50 % entre les périodes 2005-2013 et 2012-2020. Les facteurs de cette augmentation sont nombreux (sécheresse, canicule, insectes, champignons, bactéries, etc.) et les responsabilités respectives ne sont pas connues⁹⁶. À titre d'illustration, les années 2018 et 2019 ont été particulièrement néfastes pour les forêts françaises : comme l'indique la [Feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique](#), les sécheresses prolongées et les températures hors normes ont conduit notamment au dépérissement massif d'épicéas dans le quart nord-est de la France, qui s'explique à la fois par leur affaiblissement et par des attaques de ravageurs. De même, l'été 2022 a été marqué par des incendies importants, notamment dans les Landes et en Bretagne, région jusqu'à présent plutôt épargnée : plus de 66 000 hectares de forêts ont brûlé pendant l'année 2022, contre une moyenne annuelle de près de 10 000 hectares par an sur la période 2006-2021⁹⁷.

Impacts attendus du changement climatique sur la forêt

L'impact du changement climatique sur la forêt, tout comme l'ensemble de ses impacts sur les écosystèmes, est complexe⁹⁸ : si l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique est en théorie bénéfique pour la croissance des arbres, une plus haute température moyenne accroît le déficit hydrique, augmente la probabilité de feux de forêt et encourage l'apparition de nouveaux pathogènes⁹⁹.

Risques de feux de forêt et de développement d'insectes ravageurs

La sensibilité aux feux de forêt peut être traduite par l'indice forêt météo (IFM). Comme l'indique un rapport d'information du Sénat sur l'adaptation au changement climatique¹⁰⁰, sur la base des travaux de l'Onerc¹⁰¹, le nombre annuel de jours avec un risque extrême d'incendie (IFM > 40) est actuellement relativement faible dans la plus grande partie du pays (Carte 3). Ce risque extrême se retrouve principalement dans le Sud-Est, pendant dix à quarante jours

⁹⁶ IGN (2022), « [Inventaire forestier national. Mémento, édition 2022](#) », Institut national de l'information géographique et forestière, 68 p.

⁹⁷ Voir <https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/estimates>.

⁹⁸ Depuis 2008, le suivi des impacts du changement climatique fait partie des activités du réseau [Renecofor](#) de l'ONF. Pour une présentation globale des enjeux liés à l'écosystème forestier, voir CGDD (2018), [EFESE – Les écosystèmes forestiers](#), coll. « Théma Analyse – Biodiversité », octobre, 449 p. Pour une discussion des différents indicateurs de suivi des effets du changement climatique sur la forêt, voir Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt et Ecofor (2014), [Projet SICFOR. Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt – Rapport final](#), mars, 102 p.

⁹⁹ Giec (2022), [Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability](#), sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).

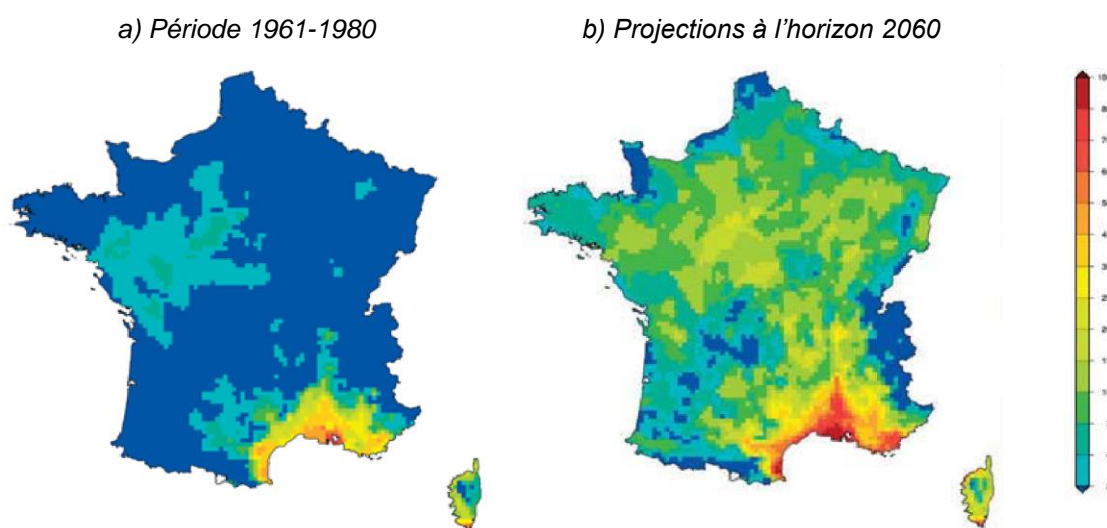
¹⁰⁰ Sénat (2019), [Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée](#), rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

¹⁰¹ Onerc (2018), [Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 199 p.

chaque année. Il devrait à la fois s'intensifier dans les zones aujourd'hui à risque et s'étendre à de nouvelles zones : vers 2060, dans un scénario RCP 6.0¹⁰², la majeure partie du pays sera soumise à ce risque extrême dix à vingt jours par an, tandis que les territoires situés en bordure de la Méditerranée et le long de l'axe rhodanien y seront soumis de quatre-vingts à cent jours par an. En conséquence, les surfaces brûlées en région méditerranéenne pourraient augmenter de 80 % d'ici 2050 (RCP 4.5), voire tripler à l'horizon 2100 dans le cas du scénario climatique le plus sévère¹⁰³. Le risque s'étendrait à des zones aujourd'hui peu impactées : près de 50 % des landes et des forêts métropolitaines pourraient être concernées par un niveau élevé de l'aléa feux de forêt, contre seulement un tiers en 2010¹⁰⁴.

En outre, l'augmentation des risques de feux de forêt n'induit pas seulement des conséquences directes au sein du secteur de la production forestière mais constitue un enjeu pour les infrastructures et les activités humaines situées à proximité. En 2022, Callendar a estimé que 316 sites industriels classés Seveso sont suffisamment proches de forêts pour être menacés en cas d'incendie et que, dans un scénario RCP 4.5, les trois quarts d'entre eux seront exposés à un risque d'incendie élevé au moins dix jours par an en 2050, contre un tiers en 2000 (Carte 4).

Carte 3 – Nombre moyen de jours par an avec un indice forêt météo (IFM) supérieur à 40 entre 1961 et 1980 (à gauche), et projections à l'horizon 2060 (à droite)



Lecture : en 2060, sous un scénario RCP 6.0, une large partie du territoire sera exposée plus de dix jours par an, pendant lesquels les conditions météorologiques seront propices aux feux de forêt.

Source : Onerc (2018), [Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 199 p., ici p. 74, à partir du portail Drias

¹⁰² En réalité, il s'agit d'un scénario A1B dans l'ancienne nomenclature du Giec (issue de leur deuxième rapport), qu'on peut assimiler à RCP 6.0.

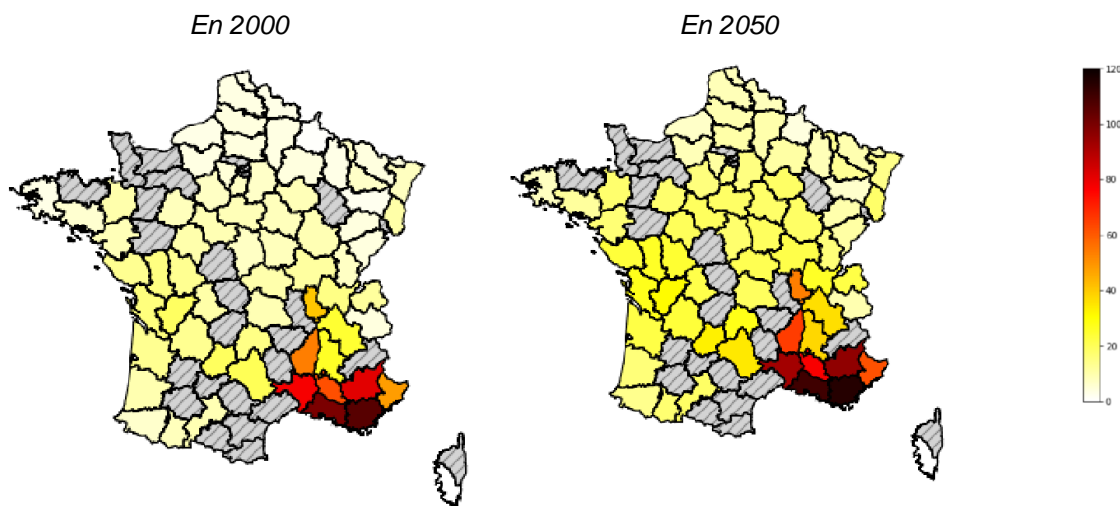
¹⁰³ Audition de François Pimont, ingénieur de recherche à l'Inrae, cité dans Sénat (2022), [Feux de forêt et de végétation. Prévenir l'embranchement](#), rapport d'information de M. Jean Bacci, Mme Anne-Catherine Loisier, MM. Pascal Martin et Olivier Rietmann, fait au nom de la commission de l'Aménagement du territoire et du Développement durable et de la commission des Affaires économiques, août.

¹⁰⁴ CGEDD, CGAAER et IgF (2010), [Rapport de la mission interministérielle Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêt](#), rapport final, juillet, 190 p. (à partir de données Météo-France).

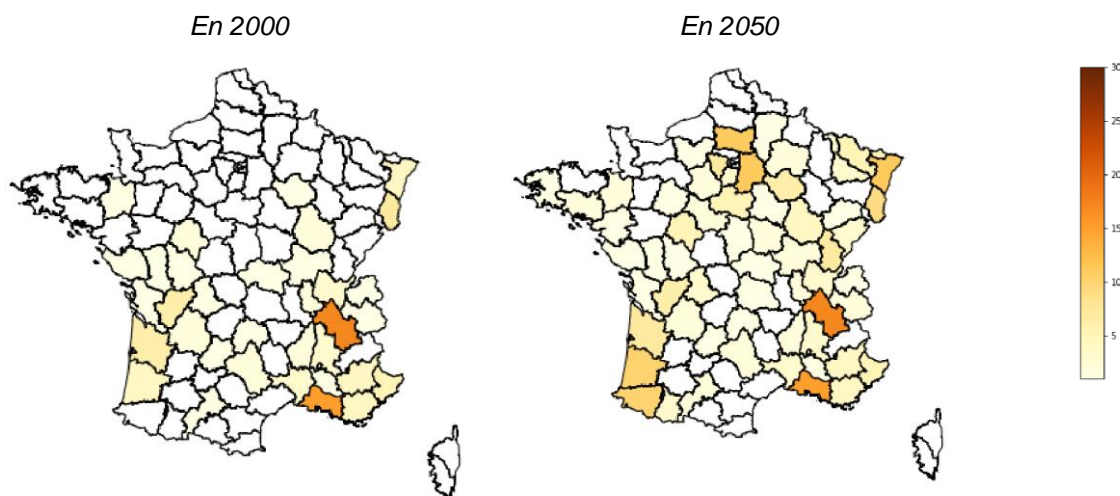
Concernant les insectes ravageurs, l'Onerc écrivait en 2014 qu'« une tendance à la recrudescence des insectes ravageurs et pathogènes semble se dégager et pourrait se poursuivre dans les prochaines années¹⁰⁵ », sans donner d'indication chiffrée.

Carte 4 – Évolution de l'exposition des sites Seveso aux feux de forêt entre 2000 et 2050

a) Nombre moyen de jours par an où les installations Seveso sont exposées à un risque d'incendie élevé



b) Nombre d'installations Seveso exposées à un risque d'incendie élevé



Lecture : si la Provence et la vallée du Rhône devraient rester les zones les plus exposées en 2050, le risque augmente de façon très marquée dans plusieurs départements du Sud-Ouest et du Centre, et un certain nombre d'installations du nord de la France dépasseraient le seuil des dix jours par an à risque très fort.

Source : Callendar (2022), « *Feux de forêt. Effets du changement climatique sur l'exposition des installations Seveso* », étude, juillet, 14 p., ici p. 9, 10 et 11

¹⁰⁵ Onerc (2014), *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*, rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 182 p., ici p. 49.

Évolution des rendements de l'activité forestière et déficit hydrique

En 2009, l'Onerc rapportait que le changement climatique pourrait avoir un impact positif sur la productivité forestière à l'horizon 2030-2050, engendrant des recettes supplémentaires de l'ordre de 150 millions d'euros par an. Cependant, les auteurs soulignaient que l'impact des événements extrêmes (dépérissement, incendies, sécheresses) pourrait compenser ces gains. À l'horizon 2100, les impacts ressortaient comme clairement négatifs, sans toutefois avoir été quantifiés¹⁰⁶. Plus récemment, l'exercice Climator¹⁰⁷ contenait un volet sur le rendement des forêts, contraint notamment par le déficit hydrique à venir. L'exemple du pin est développé, et une estimation des impacts sur les rendements de cette espèce au niveau national est proposée : - 4,6 % en futur proche (2020-2050) et - 11,6 % en futur lointain (2070-2100), dans un scénario RCP 6.0. Bioclimsol, un outil numérique de diagnostic sylvo-climatique et d'aide à la décision à l'échelle de la parcelle forestière, a été développé par le Centre national de la propriété forestière (CNPf) depuis 2010 afin d'accompagner les forestiers dans la gestion des peuplements sur pied ou pour le choix des essences lors d'un renouvellement dans un contexte de changement climatique¹⁰⁸.

Évolution des puits de carbone

L'évaluation des risques portant sur le secteur forestier est d'autant plus importante que la forêt est à la fois source de biomasse et génératrice de puits de carbone, et que sa détérioration pourrait donc nuire aux objectifs de neutralité carbone nette. L'Onerc évoquait en 2009 une baisse de la productivité forestière annuelle de 6 % à 16 % à l'horizon 2100, et donc un accroissement du stock de carbone, et non une baisse absolue du stock de carbone forestier.

En 2022, le Haut Conseil pour le climat (HCC)¹⁰⁹ rapporte que les puits nets de carbone liés aux forêts ont diminué fortement de 2013 à 2019 (- 72 %) pour augmenter de 14 % entre 2019 et 2020. En 2020, ils représentent 14 Mt éqCO₂. Les puits nets observés depuis 2010 sont 60 % plus faibles que ceux retenus par la SNBC 2. Cela s'explique à la fois par une révision des méthodologies d'inventaire, ainsi que par une détérioration du puits forestier sous l'effet de la diminution de la production biologique, de l'augmentation de la mortalité (sécheresses, tempêtes, incendies, scolytes) et de l'accroissement des prélèvements. Enfin, d'après une étude de l'Inrae et de l'IGN¹¹⁰, le stockage carbone annuel dans l'écosystème forestier pourrait être de l'ordre de 40 % plus faible dans le scénario climatique RCP 8.5 qu'à climat actuel à l'horizon 2050.

¹⁰⁶ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

¹⁰⁷ Ademe (2012), *Livre Vert du projet CLIMATOR (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, 334 p.

¹⁰⁸ Voir <https://www.cnpf.fr/n/decouvrez-bioclimsol/n:4199#p12587>.

¹⁰⁹ HCC (2022), *Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 216 p.

¹¹⁰ Roux A., Colin A., Dhôte J.-F. et Schmitt B. (2020), *Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique. Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie*, Paris, Quae, 152 p.

4. Risques littoraux

D'après le premier volume du sixième rapport d'évaluation du Giec, le niveau moyen global des mers a augmenté de 14 à 25 centimètres entre 1901 et 2018. Cette élévation s'accélère et s'amplifie à mesure que s'accumulent les effets du réchauffement climatique, sur un horizon lointain (plusieurs siècles). Cette augmentation du niveau de la mer entraîne d'une part des phénomènes de recul du trait de côte et, d'autre part, une augmentation des risques de submersion marine. Il faut donc distinguer les projections rendant compte des bâtiments, des infrastructures (ports et infrastructures terrestres) ou de tout type d'activité humaine, directement menacés par la montée du niveau des mers, des actifs et activités humaines que la montée du niveau des mers exposera à des submersions plus fréquentes.

Par ailleurs, le changement climatique n'est pas l'unique cause du recul du trait de côte, déjà visible sur 20 % du littoral métropolitain¹¹¹ : la montée du niveau des mers s'ajoute aux causes naturelles et anthropiques (artificialisation, modification des transports de sédiments) de l'érosion côtière.

Projections d'évolution des risques littoraux sous l'effet du changement climatique

Recul du trait de côte

Une agrégation de différentes estimations du nombre de logements menacés directement par le recul du trait de côte (à la fois du fait du changement climatique et des causes naturelles et anthropiques) met en avant deux types de résultats¹¹².

D'une part, le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema) a produit des estimations au niveau national (métropole et Outre-mer) à l'horizon 2050¹¹³. Dans le scénario qui suppose que l'érosion est limitée aux secteurs déjà en érosion aujourd'hui, mais où la protection assurée par les ouvrages existants est progressivement affaiblie par le contournement de la mer, 790 logements seraient menacés, sur 104 communes. Dans le scénario qui suppose une érosion généralisée sur l'ensemble du littoral (sous l'effet notamment de l'élévation du niveau de la mer¹¹⁴) et un affaiblissement progressif de la protection assurée par les ouvrages existants, 3 307 logements seraient menacés dans 317 communes. À l'horizon 2100, il ressort des travaux du Cerema que le nombre de logements atteints par le recul du trait de côte serait compris entre 5 000 et 50 000 pour une valeur estimée entre 0,8 et 8 milliards d'euros.

D'autre part, des résultats d'études plus localisées, comme celle du groupement d'intérêt public (GIP) Littoral aquitain publiée en 2018, sont disponibles. Dans son scénario le plus pessimiste, le Cerema estime à 90 le nombre de logements menacés sur le littoral aquitain en

¹¹¹ Voir « [Littoral : 126 communes face à l'érosion côtière](#) », *Vie-publique.fr*, article du 11 mai 2022.

¹¹² IgA, CGEDD et IgF (2019), *Recomposition spatiale des littoraux*, rapport, mars, 233 p.

¹¹³ Cerema (2020), *Connaissance du trait de côte. Évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte*, rapport d'étude, coll. « Connaissance », janvier, 23 p.

¹¹⁴ L'effet du changement climatique sur l'augmentation du niveau de la mer n'est pas explicitement modélisé dans ces travaux : les auteurs considèrent que ce phénomène est décrit implicitement dans leur scénario où le recul du trait de côte (actuellement à l'œuvre sur 20 % de la bande côtière) est étendu à l'ensemble du littoral.

2040, contre 1 541 dès 2025 par le GIP, à scénario comparable. Ces différents résultats s'expliquent par les hypothèses et les données utilisées (postérieures à la tempête de 2014 pour le GIP Littoral aquitain).

Les auteurs en concluent que les estimations du Cerema, réalisées de manière automatisée à partir de cartes, doivent être considérées, à scénario donné, comme un minimum. Dans ces estimations, on peut noter que l'exposition des infrastructures publiques (notamment les infrastructures de réseaux) ou des activités économiques n'est pas quantifiée.

À titre de comparaison, en 2009, l'Onerc proposait une quantification du risque sur le périmètre de l'ancienne région Languedoc-Roussillon : sous l'hypothèse d'une montée du niveau des mers de un mètre en fin de siècle, 140 000 logements (contre 15 000 logements en 2009), 80 000 personnes et 10 000 établissements (employant 26 000 salariés) seraient situés dans une zone affectée par un aléa submersion définitive ou érosion à l'horizon 2100, ce qui représenterait 15 à 35 milliards d'euros¹¹⁵. Ces chiffres régionaux étaient bien supérieurs à ceux que le Cerema a avancés plus récemment pour l'ensemble du territoire national.

Submersion marine

À cela, s'ajoutent les bâtiments menacés épisodiquement par les submersions marines. En termes d'exposition au risque, pour l'Ademe¹¹⁶, l'ensemble des surfaces de bâtiments à risque en 2020 (soit 2 % du parc) devient à « risque très important » en 2050 ; on ne constate pas de différence majeure entre les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Cela s'explique par l'inertie du phénomène de montée du niveau de la mer. L'horizon temporel (2050) ne permet pas d'observer une aggravation du risque en scénario RCP 8.5 car la différence d'élévation ne sera perceptible qu'à un horizon temporel plus lointain.

Callendar estime qu'entre 13 000 et 20 000 des 16 millions de transactions immobilières réalisées sur la période allant de mi-2016 à mi-2021 (les biens ayant été vendus plusieurs fois ne sont comptés qu'une seule fois) ont porté sur un bien exposé au recul du trait de côte ou à la submersion marine à l'horizon 2050, ce qui représente une valeur de 5 milliards d'euros¹¹⁷. Ce résultat apparaît robuste vis-à-vis du choix de la trajectoire d'émissions et du modèle utilisé. À l'horizon 2100, en revanche, 30 000 à 150 000 biens seraient concernés, pour une valeur qui varie entre 10 et 50 milliards d'euros selon le scénario choisi. Comme l'ensemble des logements est plus vaste que les seules transactions immobilières de la période 2016-2021, ces estimations sont des minorants de l'exposition.

France Assureurs estime le surcoût lié aux submersions marines à 100 millions d'euros annuels supplémentaires, presque intégralement dus au changement climatique, sur la période 2020-2050 selon le scénario RCP 8.5¹¹⁸ (voir également la fiche « [Bâtiments](#) »).

¹¹⁵ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

¹¹⁶ Ademe (2022), *Feuilleton Transition(s) 2050. Adaptation au changement climatique : transports, agriculture, forêts, industries, bâtiments*, Agence de la transition écologique, coll. « Horizons », mars, 29 p.

¹¹⁷ Callendar (2022), « *Immobilier et climat. Le marché français face au risque de submersion* », étude, février, 15 p.

¹¹⁸ France Assureurs (2021), « *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050* », étude, octobre, 30 p.

Selon le dernier rapport du Giec¹¹⁹, les coûts induits par les événements de submersion marine devraient être multipliés par dix à l'horizon 2100 en Europe, sans politique d'adaptation adéquate. Cela concernerait notamment le patrimoine culturel situé sur les côtes. Toujours au niveau européen, le programme de recherche COACCH estime que le nombre de personnes exposées à un risque de submersion marine pourrait passer de 1,8 million (RCP 2.6) à 2,9 millions (RCP 8.5) à l'horizon 2050, et de 4,7 millions (RCP 2.6) à 9,6 millions (RCP 8.5) à l'horizon 2080, en l'absence d'adaptation : ces impacts engendreraient des coûts de 135 à 145 milliards d'euros par an vers 2050 et de 450 à 650 milliards d'euros vers 2080¹²⁰. Les auteurs précisent que les dommages les plus importants seraient localisés sur les côtes de la mer du Nord (Belgique, France, Pays-Bas, Allemagne et Royaume-Uni¹²¹). On peut comparer ces résultats à ceux du programme de recherche européen Peseta IV¹²², qui évalue les dommages dus aux submersions marines à 239 milliards d'euros en scénario RCP 8.5 à l'horizon 2100, pour une population exposée de 2,2 millions de personnes. Si des politiques d'atténuation sont menées (RCP 4.5), les dommages s'élèveraient à 111 milliards d'euros par an et la population exposée serait de 1,4 million d'individus. Ces chiffres peuvent être mis en perspective avec les dommages et risques aujourd'hui : 1,4 milliard d'euros de dommages par an et 0,1 million de personnes exposées.

À noter que plusieurs projets européens sur le recul du trait de côte et les risques de submersion marine sont en cours et pourraient permettre d'éclairer les divergences entre les diverses estimations de dommages et de populations exposées disponibles dans la littérature à l'heure actuelle :

- le programme Horizon 2020 Protect¹²³, financé par l'Union européenne et coordonné par le Centre national de recherche scientifique (CNRS), vise à produire des projections robustes globales, régionales et locales de la montée du niveau des mers, à différentes échelles de temps (2050, 2100, 2500), en s'appuyant sur une description précise de l'évolution de la cryosphère et en prenant en compte les scénarios à faible probabilité et fort impact ;
- à l'échelle européenne, le projet CoCliCo¹²⁴, auquel participe notamment le BRGM, a également pour objectif de développer une plateforme open-source incluant des projections régionales d'élévation du niveau de la mer et d'érosion, l'inventaire et l'enrichissement des connaissances actuelles concernant l'exposition, en Europe, de la population, des actifs économiques et des infrastructures au risque de submersion, et le développement d'une méthode d'établissement de scénarios de protection, adaptation et retrait, en fonction des risques.

¹¹⁹ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).

¹²⁰ COACCH (2021), « *The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results* », Policy Brief, juillet, 20 p.

¹²¹ Le programme COACCH, bien que récent (2021), considère également le Royaume-Uni dans son analyse de l'Union européenne.

¹²² JRC (2020), *Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.

¹²³ <https://protect-slr.eu/objectives/>

¹²⁴ <https://coclicoservices.eu/>

5. Biodiversité

D'après la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) : « La nature a été altérée de manière significative par de multiples facteurs humains, et la grande majorité des indicateurs relatifs aux écosystèmes et à la biodiversité montrent un déclin rapide¹²⁵. » En particulier, le taux d'extinction d'espèces est aujourd'hui dix à cent fois plus élevé que le taux d'extinction moyen observé lors des dix derniers millions d'années. L'IPBES indique que les principales causes de cette érosion de la biodiversité sont : la modification de l'usage des sols et des milieux aquatiques (perte et fragmentation d'habitats) ; la surexploitation de la biodiversité (chasse, braconnage, surpêche) ; le changement climatique ; la pollution (de l'eau, de l'air, des sols) ; et l'introduction d'espèces envahissantes. Si le changement climatique n'est pas la première cause de la perte de biodiversité, il constitue néanmoins une pression directe qui exacerbe de façon croissante l'impact des autres pressions. En pratique, le réchauffement climatique induit une érosion de la biodiversité par de multiples canaux. Ainsi, d'après le rapport commun IPBES-Giec¹²⁶, l'acidification des océans et l'augmentation des températures de l'eau menacent par exemple les récifs coralliens, tandis que les écosystèmes de haute latitude et altitude, ainsi que les écosystèmes méditerranéens, sont sensibles à l'augmentation des températures.

Ce déclin de la biodiversité a des impacts directs sur les sociétés humaines, qui dépendent des écosystèmes et des services écosystémiques¹²⁷ : séquestration du carbone dans les puits naturels (océans, forêts, tourbières, etc.) ; production agroalimentaire grâce à la pollinisation et à la fertilisation des sols par certaines espèces (insectes, oiseaux, chauves-souris) ; épuration naturelle de l'eau grâce à certains végétaux et écosystèmes, en particulier dans les milieux humides ; protection du littoral contre l'érosion et atténuation de l'intensité des crues et des inondations grâce aux écosystèmes côtiers (dunes végétalisées, mangroves, récifs coralliens) et fluviaux (ripisylves), etc.

D'après le deuxième volume du sixième rapport d'évaluation du Giec¹²⁸, le changement climatique a déjà altéré les écosystèmes marins, terrestres et d'eau douce dans le monde entier. Il a entraîné des pertes d'espèces locales, une augmentation des maladies et une mortalité accrue des plantes et des animaux, ce qui a donné lieu aux premières extinctions liées au climat, à la restructuration des écosystèmes, à l'augmentation des zones brûlées par des feux de forêt et au déclin des principaux services écosystémiques. Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes ont entraîné des pertes économiques et de moyens de subsistance mesurables, ainsi qu'une altération des pratiques culturelles et des activités récréatives dans le monde entier. Des événements climatiques extrêmes se produisent sur tous les continents : les impacts les plus sévères concernent les espèces et les écosystèmes les plus sensibles au climat et limitent leur capacité à se régénérer entre les événements ou à s'adapter.

¹²⁵ IPBES (2019), *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, 1148 p.

¹²⁶ IPCC et Giec (2021), « *IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change* », juin, 24 p.

¹²⁷ Voir Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et Ministère de la Transition énergétique (2023), « *Biodiversité : présentation et enjeux* », 1^{er} février.

¹²⁸ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 2).

Évolution des risques sur la biodiversité

Conséquences physiques sur la perte de biodiversité

Au niveau mondial, selon le Giec, les menaces qui pèsent sur les espèces et les écosystèmes des océans, des régions côtières et des terres, en particulier dans les points chauds de la biodiversité, constituent un risque mondial qui s'aggravera à chaque fois qu'un dixième de degré supplémentaire de réchauffement sera atteint. La transformation des écosystèmes terrestres, océaniques et côtiers et la perte de biodiversité, exacerbées par la pollution, la fragmentation des habitats et les changements d'utilisation des terres menaceront les moyens de subsistance et la sécurité alimentaire. En l'absence de réductions urgentes et profondes des émissions, certaines espèces et certains écosystèmes, en particulier ceux des zones polaires et des zones déjà chaudes, seront confrontés dans les prochaines décennies à des températures supérieures à celles qu'ils ont connues au cours de l'histoire.

Par exemple, on s'attend à ce que des écosystèmes uniques et menacés soient exposés à des risques élevés à très court terme en cas de réchauffement planétaire de + 1,2 °C : mortalité des mammifères, blanchiment des coraux, déclin importants des espèces dépendantes des glaces de mer et événements de mortalité dus aux vagues de chaleur. Au-dessus de + 1,5 °C de réchauffement mondial, les projections indiquent qu'il y aurait une perte supplémentaire de 70 % à 90 % des coraux bâtisseurs de récifs, et que 99 % des coraux seraient perdus avec un réchauffement de + 2 °C ou plus, par rapport à la période préindustrielle¹²⁹. Enfin, le risque d'extinction des espèces endémiques augmente avec le réchauffement dans toutes les projections et est environ dix fois plus élevé quand le réchauffement passe de + 1,5 °C à + 3 °C au-dessus des niveaux préindustriels¹³⁰.

Le Fonds mondial pour la nature (WWF) a publié un rapport décrivant succinctement l'impact du changement climatique sur trente-cinq écorégions prioritaires, en s'interrogeant sur les capacités de dispersion des espèces menacées¹³¹. Les auteurs estiment le nombre d'espèces pour lesquelles un risque d'extinction au niveau local est projeté d'ici les années 2080. Le tableau 3 expose les résultats dans le cas de l'écorégion Méditerranée (qui concerne le sud-est de la France et la Corse).

D'après les travaux menés dans le cadre de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (Efese)¹³², le changement climatique a et aura de nombreux impacts sur les écosystèmes métropolitains : il affecte et affectera durablement les forêts françaises, pourra fortement affecter les écosystèmes agricoles français, constituera une menace pour les écosystèmes de haute montagne, accroîtra les situations de stress hydrique auxquelles sont exposés les milieux aquatiques et terrestres et induit déjà des modifications des milieux qui affectent la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins. À cela s'ajoute le fait que les écosystèmes ultramarins apparaissent particulièrement vulnérables au changement climatique (perturbation récente et de grande ampleur de la forêt amazonienne, exposition accrue aux incendies des écosystèmes altimontains réunionnais ou très forte vulnérabilité des écosystèmes coralliens).

¹²⁹ *Ibid.* (chapitre 15).

¹³⁰ *Ibid.* (article inter-chapitre 1).

¹³¹ WWF (2018), *La nature face au choc climatique. L'impact du changement climatique sur la biodiversité au cœur des Écorégions Prioritaires du WWF*, mars, 44 p.

¹³² CGDD (2020), *Du constat à l'action. Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques*, Paris, La Documentation française, 266 p. (chapitre 2).

Tableau 3 – Pourcentage d'espèces pour lesquelles est projeté un risque d'extinction au niveau de l'écorégion Méditerranée d'ici les années 2080 selon différents scénarios de réchauffement global

Groupe d'espèces	Scénario de changement du climat mondial					
	2 °C		3,2 °C		4,5 °C	
	Sans dispersion	Avec dispersion	Sans dispersion	Avec dispersion	Sans dispersion	Avec dispersion
Plantes	36	36	55	55	69	69
Oiseaux	21	10	35	22	49	36
Mammifères	29	16	45	30	60	45
Amphibiens	26	26	43	43	57	57
Reptiles	16	16	30	30	43	43

Lecture : le tableau expose trois scénarios différents concernant le changement climatique à l'échelle mondiale, avec une modélisation du risque selon que la dispersion ait lieu ou non. Dans le cas d'un réchauffement de + 2 °C, la part des mammifères menacés d'extinction dans l'écorégion Méditerranée, qui comprend entre autres le sud de la France et la Corse, est estimée entre 16 % et 29 %.

Source : WWF (2018), *La nature face au choc climatique. L'impact du changement climatique sur la biodiversité au cœur des écorégions prioritaires du WWF*, mars, 44 p.

Activités économiques liées à la biodiversité

Comme il est difficile d'isoler la perte de biodiversité due au changement climatique, nous indiquons ici les risques projetés sur la biodiversité française en général (c'est-à-dire induits par l'ensemble des causes mentionnées plus haut) : en première approche, les travaux de l'Efese soulignent que les écosystèmes français sont le support d'activités économiques représentant un chiffre d'affaires de plus de 80 milliards d'euros ainsi que de centaines de milliers d'emplois directs répartis sur l'ensemble des territoires. Ces chiffres peuvent être vus comme une limite haute d'un impact de la baisse de la biodiversité sur l'activité économique. Par ailleurs, de nombreux autres services non marchands, non répertoriés ici, contribuent également au bien-être des Français, peut-être parfois davantage que les services clairement monétisables : à titre d'exemple, le bois récolté représente une valeur annuelle de 2 milliards d'euros, mais la méthode des coûts de déplacement permet d'estimer le consentement à payer des Français pour se rendre en forêt à près de 10 milliards d'euros par an. Une évaluation large des services écosystémiques à l'échelle nationale a été envisagée dans la première phase des travaux de l'Efese, mais s'est révélée compliquée à entreprendre. Une telle évaluation est inscrite dans le troisième axe de la deuxième phase du programme. Les familles de services écosystémiques envisagées dans le cadre de l'Efese sont¹³³ :

- la fourniture de biens : denrées alimentaires, matériaux biosourcés, ressources médicinales, biochimiques et génétiques, objets décoratifs ou utilitaires ;
- les services de régulation : régulation mondiale et locale du climat, de l'érosion et des risques physiques, des conditions de culture et d'élevage, de la qualité de l'eau, des débits d'étiage, de la qualité de l'air ;
- les services culturels : récréation, aménités paysagères, éducation et connaissance.

¹³³ *Ibid.* (chapitre 3).

Un récent rapport de l'IGEDD et de l'IgF indique, en s'appuyant sur les travaux de l'Efese, que le service de séquestration carbone dans les écosystèmes au niveau français a une valeur de 7 milliards d'euros par an, et que les services rendus par la pollinisation sont évalués à entre 2,3 et 5,3 milliards d'euros par an¹³⁴. Par ailleurs, à partir d'une estimation de la dépendance de cent-soixante-sept secteurs d'activité à vingt-et-un services écosystémiques, disponible dans la littérature, la Direction générale du Trésor a conclu que 44 % de la valeur ajoutée brute française apparaît comme « fortement » ou « très fortement » dépendante du capital naturel¹³⁵. Cette dépendance correspond ou bien à une vulnérabilité à l'érosion de la biodiversité ou bien à une contribution à cette érosion. Parmi les secteurs les plus dépendants au niveau français figurent l'agriculture et l'industrie alimentaire, ou encore la construction et les activités immobilières.

¹³⁴ IGEDD et IgF (2022), *Le financement de la stratégie nationale pour la biodiversité (SNB) pour 2030*, rapport, novembre, 416 p. (Annexe VI), citant CGDD (2016), *EFESE – Le service de pollinisation*, coll. « Théma Essentiel – Biodiversité », juin, 4 p.

¹³⁵ DG Trésor (2021), « *Évaluations économiques des services rendus par la biodiversité* ».

6. Énergie (offre et demande d'électricité)

Le changement climatique peut avoir des conséquences à la fois¹³⁶ sur la demande d'énergie – car l'augmentation de la température moyenne globale réduit les besoins de chauffage en hiver et accroît les besoins de climatisation en été – et sur l'offre d'énergie – car (1) les événements extrêmes, notamment les canicules ou les sécheresses, peuvent endommager les réseaux d'énergie et les infrastructures de production et (2) la modification tendancielle du climat peut affecter le facteur de charge des capacités de production d'électricité.

D'après le Giec¹³⁷, au niveau européen, ces deux effets sont déjà observables. D'une part, sur la période 1951-2014, le nombre de degrés-jours de chauffe¹³⁸ a diminué et le nombre de degrés-jours de réfrigération a augmenté. D'autre part, des réductions significatives et des interruptions de la production d'électricité ont eu lieu lors de certaines années exceptionnellement sèches ou chaudes ces dix dernières années, comme en 2018 (en France, en Allemagne, en Suisse, au Royaume-Uni). Au niveau français, le gestionnaire du réseau de transport de réseau d'électricité (RTE) rapporte que, lors de la canicule de juillet 2019, les indisponibilités du parc nucléaire liées aux contraintes réglementaires sur l'usage de l'eau ont atteint près de 6 Gigawatt (GW) (soit environ 10 % de la puissance installée).

Projections des effets du changement climatique sur la demande en électricité

Selon le Giec, la demande énergétique devrait baisser presque partout en Europe, excepté pour certains pays (comme le Royaume-Uni, l'Espagne et la Norvège). En effet, au niveau européen, le programme de recherche Peseta III¹³⁹ considère que les effets conjugués de la baisse de demande en chauffage et de l'augmentation des besoins en climatisation conduisent à une baisse de la demande énergétique annuelle de 5 % à l'horizon 2050 si le réchauffement global reste sous + 2 °C, et de 27 % en fin de siècle si le réchauffement dépasse + 3 °C. De plus, l'augmentation de la demande en climatisation serait localisée essentiellement dans le sud de l'Europe.

Au niveau français, RTE évalue l'évolution de la demande en électricité à l'horizon 2050 en prenant en compte :

- l'effet direct du changement climatique, à la baisse sur la consommation de chauffage et à la hausse pour la climatisation ;
- l'« effet parc », c'est-à-dire l'effet haussier lié à l'augmentation du parc de logements chauffés à l'électricité (pompes à chaleur) et l'effet baissier lié à l'amélioration (1) de l'isolation thermique du bâti et (2) de la performance des systèmes de chauffe.

¹³⁶ RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050*, rapport complet, juin, 988 p. (chapitre 8).

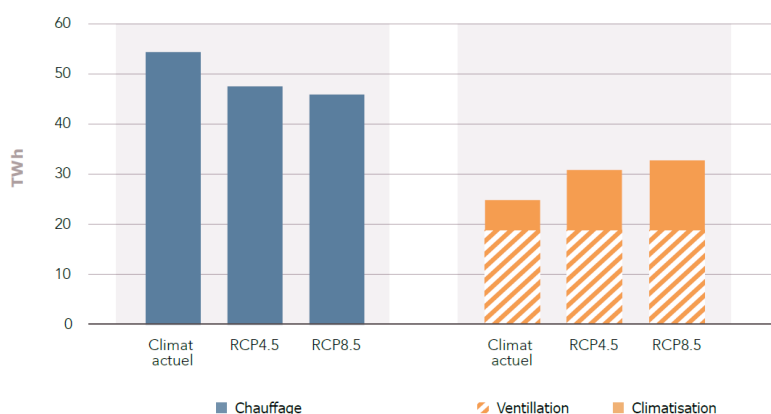
¹³⁷ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).

¹³⁸ On appelle degré-jour de chauffe (respectivement de réfrigération) la somme sur une période des différences, en degrés Celsius, entre la température moyenne extérieure et le seuil conventionnel auquel aucun chauffage (respectivement aucune réfrigération) n'est nécessaire. Cette quantité permet de calculer les besoins de chauffage (respectivement de climatisation) d'un bâtiment sur une période donnée. Voir Météo-France (s.d.), « DJU : prochains relevés ».

¹³⁹ JRC (2018), *Climate Impacts in Europe: Final Report of the JRC Peseta III Project*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, 94 p.

De manière globale, dans les deux scénarios climatiques considérés (RCP 4.5 et RCP 8.5), la consommation cumulée d'électricité dédiée au chauffage et à la climatisation à l'horizon 2050 serait globalement équivalente (Graphique 1) à celle d'aujourd'hui, mais répartie différemment, ce qui conduirait à lisser la demande dans l'année. Cela mènerait en particulier à diminuer les pointes hivernales et à augmenter les pointes estivales. À titre de comparaison, l'Onerc rapportait en 2009 que la hausse des températures pourrait induire une diminution de plus de 3 % de la consommation énergétique française à l'horizon 2100¹⁴⁰.

Graphique 1 – Consommations électriques liées au chauffage et à la climatisation en 2050 selon différents scénarios de changement climatique



Lecture : la demande en énergie pour le chauffage passerait sous la barre de 50 TW à l'horizon 2050 dans le cas des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. En revanche, la demande en énergie pour la climatisation augmenterait de plus de 10 TW sous l'effet du changement climatique (alors que la demande liée à la ventilation resterait stable).

Source : RTE (2022), [Futurs énergétiques 2050, rapport complet, juin, 988 p., chapitre 8, ici p. 407](#)

Projections des effets du changement climatique sur l'offre d'électricité

Au niveau européen, le programme de recherche Peseta IV¹⁴¹ évalue l'impact du changement climatique sur la production annuelle de plusieurs mix énergétiques : (1) l'actuel (2020) ; (2) un mix en adéquation avec un monde à + 2 °C ; (3) un mix en adéquation avec un monde à + 2 °C avec adaptation dans le domaine du refroidissement de l'eau (Graphique 2). La conjonction de l'augmentation de la disponibilité en eau au nord de l'Europe et de la baisse au sud conduit globalement à une augmentation de la production d'hydroélectricité et à une baisse de la production nucléaire. Les effets sur le soleil et l'éolien sont faibles.

Le programme de recherche COACCH présente lui aussi des évaluations de la production en moyenne annuelle au niveau européen¹⁴² :

- dans un scénario RCP 4.5 sont anticipées : une baisse du facteur de charge de l'éolien de 5,6 % en 2050 et de 7,3 % en fin de siècle (plus grandes baisses au nord de l'Autriche, au nord-est de l'Italie, à l'est de la Suisse, et augmentations au Royaume-Uni et en Irlande) ; des baisses de la production d'hydroélectricité, les plus fortes en

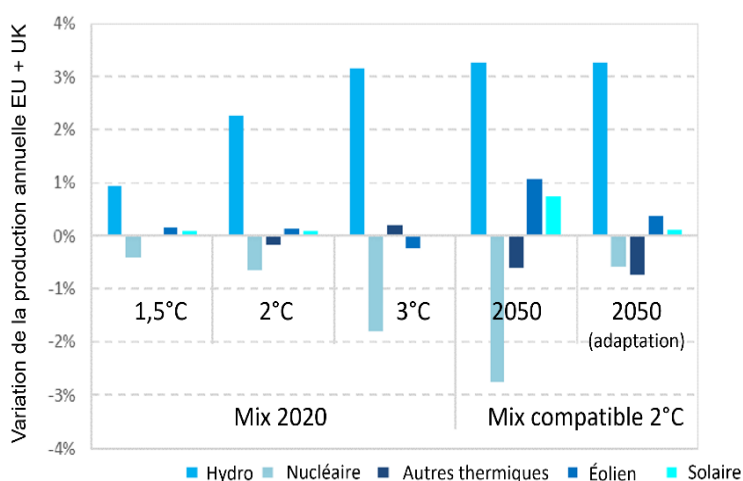
¹⁴⁰ Onerc (2009), [Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation](#), Paris, La Documentation française, 194 p.

¹⁴¹ JRC (2020), [Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report](#), Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.

¹⁴² COACCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.

- Finlande (6,3 %), en Estonie (6,2 %) et en Serbie (5,9 %), en 2050 – pays où l'hydroélectricité représente une part significative du mix électrique –, et s'accroissant à des pertes de 10 % en Slovénie, en Croatie et en Autriche pour la fin de siècle ;
- dans un scénario RCP 8.5 sont anticipées une baisse du facteur de charge de l'éolien de 6,9 % en 2050 et de 9,7 % à l'horizon 2070, avec les plus fortes baisses en Suède et en Andalousie ; une baisse de la production d'hydroélectricité pouvant atteindre 13 % en Serbie, en Roumanie, en Hongrie et en Suède pour la fin de siècle.

Graphique 2 – Impacts du changement climatique sur la production d'électricité en Europe en 2050, avec le mix électrique de 2020 ou un mix compatible avec un réchauffement global de moins de 2 °C (avec et sans adaptation des dispositifs de refroidissement de l'eau)



Note : les auteurs ne prennent pas en compte l'effet des extrêmes climatiques sur les quantités produites et sur la résilience des infrastructures (l'analyse est menée à résolution saisonnière et à l'échelle nationale).

Lecture : si le profil du mix électrique de 2020 est maintenu en 2050 (à gauche du graphique), dans un scénario de réchauffement à + 3 °C, la production nucléaire baisse de presque 2 % et celle d'hydroélectricité augmente de plus de 3 %. Dans le cas d'un mix électrique compatible avec un objectif de limitation du réchauffement à + 2 °C et sans politique d'adaptation (à droite du graphique), en 2050 la production d'électricité nucléaire baisse de presque 3 % et celle de l'éolien augmente de plus de 1 %.

Source : JRC (2020), *Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p., ici p. 56

On remarque que ces deux programmes de recherche arrivent à des conclusions contrastées en ce qui concerne l'impact sur l'éolien et l'hydroélectrique.

Au niveau français, RTE analyse la performance des différents moyens de production d'électricité, à l'horizon 2050, dans les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, et souligne les situations météorologiques les plus susceptibles d'entraîner une rupture de l'équilibre entre l'offre et la demande :

- **Nucléaire.** En cas de canicule ou de sécheresse importante, susceptibles de faire augmenter la température de l'eau et/ou de diminuer le débit de la rivière sur laquelle est située la centrale, certains réacteurs doivent baisser leur production voire s'arrêter pour respecter les contraintes réglementaires liées (1) à l'échauffement maximal du milieu aquatique et (2) aux prélèvements d'eau. Les centrales concernées par ce risque sont principalement celles situées en bord de fleuve (42 réacteurs), et non celles situées en bord de mer (14 réacteurs). Selon RTE, l'impact en termes de production annuelle perdue à l'horizon 2050 reste très faible en moyenne (1 à 2 TWh selon les scénarios de mix considérés), même s'il peut atteindre des niveaux bien supérieurs dans des configurations annuelles défavorables (plus de 10 TWh sur certaines années

simulées)¹⁴³. Au-delà des pertes moyennes, le risque d'indisponibilité simultanée du parc nucléaire en bord de fleuve à un instant donné doit évoluer de 4 GW une année sur 10 GW en 2000 à 6 GW en scénario RCP 4.5 et 8,5 GW en scénario RCP 8.5 à l'horizon 2050. RTE précise que « dans un contexte marqué par une augmentation de la pointe de consommation liée à la climatisation et des risques accrus de sécheresses à la fin de l'été, ces pertes de puissance disponible ne sont pas négligeables¹⁴⁴ » et souligne l'enjeu de la localisation des éventuelles nouvelles centrales qui en découle.

- **Hydroélectricité.** En 2050, le productible hydraulique annuel moyen estimé est globalement équivalent à celui d'aujourd'hui (autour de 60 TWh) pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, malgré une hausse de la capacité installée (1 GW d'ici à 2050). Les auteurs soulignent cependant les incertitudes autour de l'évolution du débit réel des cours d'eau à long terme (liée à l'augmentation éventuelle des besoins en eau des autres secteurs et à l'incertitude inhérente aux projections hydrologiques) et les conséquences sur les réservoirs hydrauliques à la fin de l'automne, entraînant des risques de sécheresse prolongée. À titre de comparaison, en 2009, l'Onerc soulignait que la baisse des précipitations pourrait induire une baisse moyenne de l'ordre de 15 % du potentiel productible hydroélectrique, mais précisait que les modèles utilisés ne permettaient pas une modélisation très précise. Sur la base de ces faits, la Cour des comptes estime que le risque est mesuré mais alerte sur le besoin d'éclairer les choix vis-à-vis des réacteurs à construire en intégrant les enjeux relatifs à l'adaptation au changement climatique, notamment les impacts sur la contrainte hydrique¹⁴⁵.
- **Éolien et photovoltaïque.** L'analyse des effets du changement climatique met en évidence un impact *a priori* limité sur la production photovoltaïque et éolienne.

Capacité des mix énergétiques à assurer l'équilibre offre-demande d'électricité

Plusieurs scénarios météorologiques ont été identifiés par RTE comme pouvant mettre en péril l'équilibre entre l'offre et la demande : les périodes sans vent (risque sur le facteur de charge éolien), les canicules (dégradation du rendement photovoltaïque, corrélation avec un niveau de vent faible, pic de climatisation, rendement et disponibilité des centrales thermiques et nucléaires), les sécheresses (impacts sur l'hydraulique et le nucléaire). Des *stress tests* ont été réalisés dans chaque cas et il ressort que le scénario le plus à risque correspond à des situations de manque de vent conjugué à une vague de froid sur une grande partie de l'Europe. Dans ce cas, la puissance potentiellement délestée serait de l'ordre de 4 à 10 GW pendant quatre heures consécutives, ce qui signifie que 5 % à 10 % des consommateurs seraient privés d'électricité de manière temporaire. Ce scénario de « défaillance » resterait toutefois rare puisqu'il ne serait amené à se reproduire en moyenne qu'une fois tous les vingt ans. De plus, il serait localisé en saison froide, c'est-à-dire qu'il ne coïnciderait pas directement avec la réduction des capacités de production nucléaires et hydroélectriques liée aux épisodes de sécheresses et de fortes chaleurs.

¹⁴³ À titre de comparaison, la production française d'électricité d'origine nucléaire représentait un total annuel de 379,5 TWh en 2019. Voir EDF (s.d.), « [Le nucléaire en chiffres](#) ».

¹⁴⁴ RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050*, *op. cit.*, chapitre 8, p. 379.

¹⁴⁵ Cour des comptes (2023), *L'adaptation au changement climatique du parc de réacteurs nucléaires*, Communication à la commission des finances du Sénat, mars, 116 p.

7. Infrastructures et réseaux

De même que les bâtiments, les infrastructures et réseaux seront soumis aux aléas climatiques, qu'il s'agisse des infrastructures de transport, d'énergie ou d'eau. Les aléas identifiables *a priori* (hausse des températures, précipitations intenses, stress hydrique, inondations et glissements de terrain, montée du niveau de la mer) ne sont pas forcément tous d'égale nuisance. Au point de vue méthodologique, le Cerema a produit un guide d'analyse des vulnérabilités des infrastructures de transport au changement climatique¹⁴⁶ et le CGDD une méthode d'évaluation des coûts consécutifs à l'indisponibilité de ces mêmes infrastructures¹⁴⁷. Des exemples récents donnent la mesure des enjeux. En 2020, la tempête Alex a engendré plus de un milliard d'euros de dommages, liés notamment au réseau routier¹⁴⁸. De même, les inondations qui ont frappé l'Europe du Nord en juillet 2021 ont infligé entre 700 millions et 2 milliards d'euros de dommages aux infrastructures routières et ferroviaires allemandes¹⁴⁹.

Projections d'évolution des risques pesant sur les infrastructures et les réseaux

Carbone 4 a publié en décembre 2021 une revue de littérature des impacts du changement climatique sur différents types d'infrastructures et de réseaux¹⁵⁰. Ce travail tente également d'évaluer le coût de l'inaction à travers les investissements nécessaires pour remettre en état les ouvrages d'art à la suite des conséquences prévues du changement climatique à l'horizon 2050. Par ailleurs, un travail de France Stratégie publié en mai 2022¹⁵¹ revient sur les risques physiques auxquels sont soumis les réseaux d'infrastructures de transport terrestre, d'électricité et de télécommunications, et souligne l'importance de tenir compte de leurs liens de dépendance.

Réseaux de transports

- **Réseau routier.** Les inondations, les submersions marines ou les glissements de terrain peuvent entraîner des coupures de la circulation, voire la destruction localisée de certaines portions du réseau. La sensibilité des routes à la température, notamment lors des vagues de chaleur, constitue également un risque. D'après Carbone 4, qui généralise à la totalité du réseau routier français les résultats d'une analyse de cycle de vie réalisée sur un cas type de route individuelle¹⁵², l'impact d'une augmentation de

¹⁴⁶ Cerema (2019), *Vulnérabilités et risques. Les infrastructures de transport face au climat*, rapport d'étude, coll. « Connaissance », novembre, 526 p.

¹⁴⁷ CGDD (2017), *Indisponibilité d'une infrastructure de transports. Mesurer et réduire les coûts*, coll. « Théma Analyse – Transport », octobre, 61 p.

¹⁴⁸ Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir », France Stratégie, *La Note d'analyse*, n° 108, mai, 12 p.

¹⁴⁹ Kocks E. E., van Ginkel K. C. H., van Marle M. J. E. et Lemnitzer A. (2022), « Brief communication: Critical infrastructure impacts of the 2021 mid-July western European flood event », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22(12), novembre, p. 3831-3838.

¹⁵⁰ Carbone 4 (2021), *Le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France*, rapport complet, décembre, 105 p. Ce travail donne un ordre de grandeur à la fois des coûts engendrés par le changement climatique et des dépenses qu'il serait nécessaire d'engager pour adapter les infrastructures étudiées, ce qui illustre les possibles chevauchements entre les deux notions.

¹⁵¹ Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « Risques climatiques, réseaux et interdépendances... », *op. cit.*

¹⁵² Les auteurs exploitent Qiao Y., Dawson A. R., Parry T. et Flintsch G. W. (2015), « Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, n° 41, décembre, p. 492-503, qui estiment l'évolution du coût en analyse de cycle de vie d'une route américaine (Virginie) sous l'effet des vagues de chaleur sous plusieurs scénarios climatiques.

la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur sur l'entretien des routes est estimé à 22 milliards d'euros en cumulé sur la période 2035-2050, soit une augmentation moyenne de 1,5 milliard d'euros par an sur cette période. Il s'agirait d'une augmentation de 10 % du budget total alloué à la rénovation des routes en France chaque année (8 milliards d'euros en 2016). Ce chiffre peut être comparé aux coûts avancés en 2009 par l'Onerc, qui se concentrait sur l'impact des aléas d'inondation et de canicule sur le seul réseau routier national : le sens de l'évolution des coûts d'entretien était incertain (allant de - 9 millions d'euros à + 70 millions d'euros) ; 2 milliards d'euros de patrimoine (réseau national sans les autoroutes) était exposé en cas de remontée du niveau de la mer d'un mètre¹⁵³. Un récent rapport de la Cour des comptes présente les coûts de différents aléas météorologiques récents sur le réseau routier¹⁵⁴ : par exemple, plus de 6 millions d'euros ont été dépensés dans le Gard pour réparer les conséquences des intempéries des années 2015-2016 ; de même, 2,7 millions d'euros ont été alloués à la réparation des dégâts causés par l'épisode pluvieux de 2018 dans l'Hérault. Ce même rapport remarque qu'une meilleure connaissance globale des effets du changement climatique dans le domaine serait un élément clé pour informer la prise de décision. Au niveau européen, le programme COACCH évalue l'impact du changement climatique sur le réseau routier par le biais des coûts liés aux seuls risques d'inondation¹⁵⁵ : à l'horizon 2050, l'estimation des dommages annuels va de 954 millions d'euros (RCP 4.5) à 1 146 millions d'euros (RCP 8.5) ; à l'horizon 2080, de 1 469 millions d'euros (RCP 4.5) à 2 286 millions d'euros (RCP 8.5). Ces chiffres peuvent être comparés à un coût annuel européen de 200 millions d'euros.

- **Réseau ferroviaire.** Les inondations et les risques de ruissellement constituent une menace importante pour l'intégrité structurelle des rails à l'horizon 2050. Par ailleurs, le changement climatique peut également exposer les rails et les caténaires à des risques de déformation sous l'effet de la chaleur et les installations de traction électrique au risque de surchauffe et d'incendie lors des épisodes de canicule. Ces différents aléas pourraient engendrer des baisses, voire des limitations de trafic. Enfin, les tunnels ferroviaires sont spécifiquement exposés aux inondations et aux glissements de terrain, et sont potentiellement sensibles au risque de retrait-gonflement des argiles. Selon les estimations de Carbone 4, le cumul des investissements curatifs additionnels engendrés uniquement par les impacts d'inondation et de ruissellement atteindrait 200 millions d'euros entre 2035 et 2050 pour les voies ferroviaires¹⁵⁶ (soit plus de 13 millions d'euros par an) et de 150 millions

¹⁵³ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

¹⁵⁴ Cour des comptes (2022), *L'entretien des routes nationales et départementales*, rapport public thématique, mars, 139 p.

¹⁵⁵ COACCH (2021), « *The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results* », Policy Brief, juillet, 20 p.

¹⁵⁶ Les auteurs mobilisent une récente étude au niveau européen sur l'impact du risque d'inondation sur les réseaux ferroviaires, qui détaille les coûts par pays : Bubeck P., Dillenardt L., Alfieri L., Feyen L., Thieken A. H. et Kellermann P. (2019), « Global warming to increase flood risk on European railways », *Climatic Change*, n° 155, avril, p. 19-36. Cependant, ils renvoient à la baisse les projections avancées dans cette source académique dans laquelle les coûts actuels étaient surévalués en comparaison avec les coûts réels observés par SNCF Réseau.

d'euros pour les tunnels ferroviaires¹⁵⁷ (soit autour de 5 millions d'euros par an). Ces sommes peuvent être comparées avec les dommages actuels induits par l'aléa inondation (entre 1 et 2 millions d'euros par an), et sont à ajouter au budget annuel moyen investi par SNCF Réseau pour entretenir et renouveler son réseau (2,9 milliards d'euros par an)¹⁵⁸.

- **Aéroports.** Carbone 4 considère l'impossibilité pour certains avions de décoller du fait d'une vague de chaleur et évalue à environ 100 millions d'euros à l'horizon 2050 les pertes liées à l'excédent brut d'exploitation, soit plus de 3 millions d'euros par an en moyenne¹⁵⁹. Ce résultat est obtenu en estimant le nombre de journées ou demi-journées où les décollages sont rendus impossibles par les chaleurs extrêmes.

Réseaux d'électricité

France Stratégie souligne les risques de surchauffe et d'incendie pour les composants électriques et électroniques du réseau ainsi que les risques d'interruption du transport d'électricité en fonction de la température de dimensionnement des câbles¹⁶⁰. De même, les inondations ou les vents violents constituent un risque d'endommagement des réseaux de transport et de distribution d'électricité (câbles, pylônes, lignes). Selon Carbone 4, l'investissement curatif induit par l'intensification et la multiplication des aléas climatiques extrêmes est estimé à 1,7 milliard d'euros à l'horizon 2050, à partir d'une analogie avec une étude similaire menée sur le réseau électrique américain¹⁶¹, soit 56 millions d'euros en moyenne par an. Sont pris en compte les impacts sur la durée de vie des transformateurs de sous-stations et de distribution, sur la capacité des lignes de distribution et de transmission ; les dommages causés par les incendies aux lignes de transmission ; le risque de submersion des sous-stations du fait des tempêtes ou de la montée du niveau de la mer ; la gestion de la végétation ; la pourriture des poteaux en bois. On peut mettre ce résultat en comparaison de l'enveloppe de 8 milliards d'euros demandée par RTE pour renouveler les ouvrages les plus anciens de son réseau à l'horizon 2035, indépendamment des enjeux du réchauffement climatique.

Comme souligné dans le travail de Carbone 4, l'ensemble de ces estimations sont des premiers ordres de grandeur qui gagneraient à être complétés par des études territoriales. La mise en place d'une structure de gouvernance nationale des risques sur les infrastructures¹⁶², s'appuyant sur des expérimentations territoriales, serait un cadre idéal pour valider les coûts estimés jusqu'à présent.

¹⁵⁷ Les auteurs se sont fondés sur Huibregtse E., Morales Napoles O., Hellebrandt L., Paprotny D. et de Wit S. (2016), « Climate change in asset management of infrastructure: A risk- based methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels », *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 16(1), janvier, p. 98-113.

¹⁵⁸ SNCF Réseau (2020), *Rapport financier annuel du groupe SNCF Réseau*, décembre.

¹⁵⁹ Cette situation s'est déjà produite en 2017 : pendant plusieurs jours, aucun avion n'a pu décoller de l'aéroport de Phoenix en Arizona, où la température avoisinait les 47 °C.

¹⁶⁰ Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir », *op. cit.*

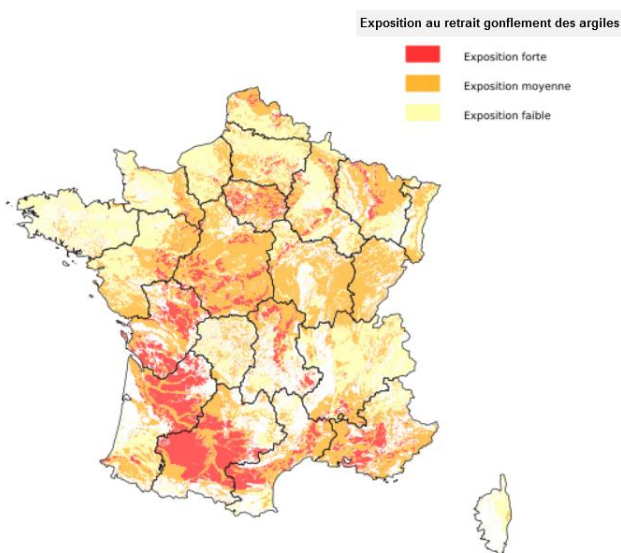
¹⁶¹ Fant C., Boehlert B., Strzepek K., Larsen P., White A., Gulati S., Li Y. et Martinich J. (2020), « Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure », *Energy*, n° 195, mars. L'analogie faite avec le réseau américain pose question, autant au regard des éventuelles différences entre les deux réseaux que vis-à-vis de l'incertitude qui entoure l'évolution des vents forts et des précipitations intenses sous l'effet du changement climatique sur le territoire national.

¹⁶² Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir », *op. cit.*

8. Bâtiments

Dans une étude sur les impacts du changement climatique sur les bâtiments aux horizons 2050 et 2100¹⁶³, l'Ademe identifie les canaux par lesquels le changement climatique menace les bâtiments : le retrait-gonflement des argiles, les risques d'inondations, de submersion marine, l'exposition aux feux de forêt, les cyclones (pour les Outre-mer). Ces risques préexistent au changement climatique, mais pourraient se retrouver accentués ou modifiés avec le réchauffement global. À titre d'illustration, actuellement et hors effet additionnel du changement climatique, le phénomène de sécheresse géotechnique – le retrait-gonflement des argiles – concerne déjà environ 10,4 millions de maisons individuelles (soit 54,2 % de l'habitat individuel), construites dans des zones moyennement ou fortement exposées¹⁶⁴ (Carte 5).

Carte 5 – Exposition actuelle de la France métropolitaine au risque de retrait-gonflement des sols argileux



Lecture : aujourd'hui le sud-ouest de la France est déjà fortement exposé au risque de retrait-gonflement des argiles et le centre de la France est moyennement exposé. La Bretagne reste par exemple faiblement exposée.

Source : BRGM, voir *InfoTerre* (2019), « *Exposition au retrait-gonflement des argiles* », 9 septembre

Projections d'évolution du niveau de risque pour les bâtiments

Plusieurs éléments de chiffrage des risques pesant sur les bâtiments existent à l'échelle européenne :

- le dernier rapport du Giec¹⁶⁵ souligne que le risque d'inondation va augmenter en Europe, doublant le coût de dommages et le nombre de personnes touchées pour un niveau de réchauffement global au-delà de 3 °C ;
- d'après le programme de recherche européen COACCH¹⁶⁶, les dommages supplémentaires engendrés par les inondations dues au changement climatique

¹⁶³ Ademe (2022), *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*, Agence de la transition écologique, coll. « Expertises », octobre, 237 p.

¹⁶⁴ CGDD (2021), « *Cartographie de l'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles* », note méthodologique, juin, 50 p., mentionnée dans HCC (2021), *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 183 p.

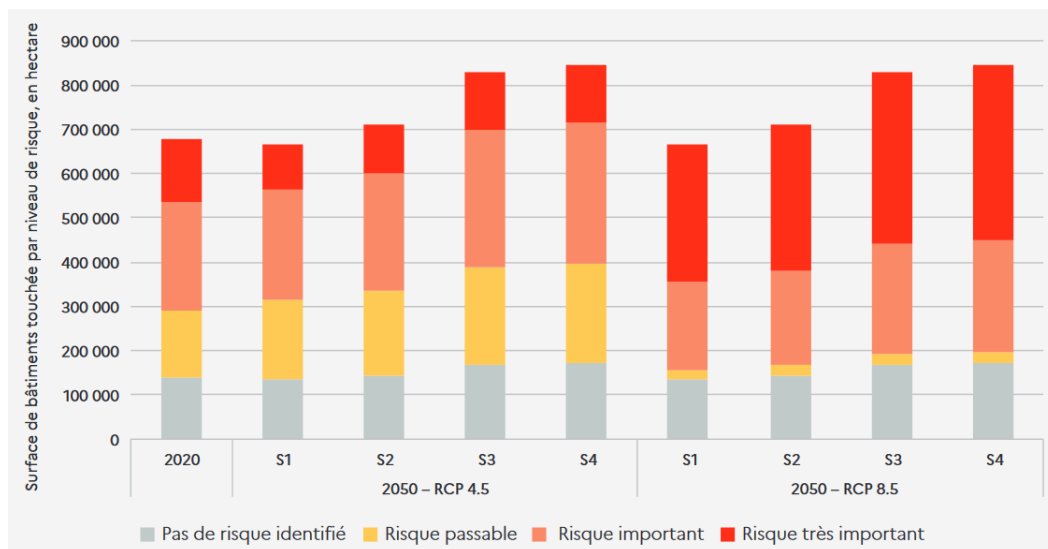
¹⁶⁵ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février.

s'élèveraient à 12 milliards d'euros par an (estimations moyennes à partir de RCP 2.6 et RCP 4.5) à l'horizon 2050, et à 20 milliards d'euros par an à l'horizon 2080 ;

- d'après le programme de recherche européen Peseta IV¹⁶⁷, les coûts induits par les inondations passeraient de 7,8 milliards d'euros à 48 milliards d'euros en 2100 à + 2 °C. La même étude estime que les dommages engendrés par les épisodes de sécheresse passeraient de 9 milliards d'euros par an aujourd'hui à 45 milliards à l'horizon 2100 pour un niveau de réchauffement global de + 3 °C : cette somme serait divisée par deux pour un niveau de réchauffement global de + 1,5 °C. Enfin, 15 millions de personnes supplémentaires seraient exposées à un risque de feu de forêt (+ 24 %) pour un niveau de réchauffement global de + 3 °C : ce chiffre serait réduit à 5 millions de plus pour + 1,5 °C.

Au niveau français, d'après l'Ademe, le risque « sécheresse et retrait-gonflement des argiles » pour le parc bâti va s'accroître entre 2020 et 2050, en particulier dans le cas d'un changement climatique important (Graphique 3).

Graphique 3 – Évolution de l'exposition au risque de sécheresse et retrait-gonflement des argiles en 2050 par rapport à 2020 selon différents scénarios de changement climatique



Note : le risque « passable » correspond aux surfaces bâties localisées sur une zone à risque RGA faible et non soumise aux sécheresses extrêmes et/ou à risque RGA moyen et soumise à une sécheresse modérée. Le risque « important » ou « très important » correspond aux surfaces bâties localisées sur une zone de risque RGA fort et/ou de sécheresse extrême.

Lecture : sous le scénario d'émissions de gaz à effet de serre RCP 8.5 (à droite), les surfaces à risque « très important » passent, en ordre de grandeur, de 20 % à 40 % du parc, et ce quel que soit le scénario d'atteinte de la neutralité carbone en 2050 considéré par l'Ademe (S1 Génération frugale, S2 Coopérations territoriales, S3 Technologies vertes, S4 Pari réparateur). Dans un scénario RCP 4.5, les proportions sont peu modifiées.

Source : Ademe (2022), [Feuilleton Transition\(s\) 2050. Adaptation au changement climatique : transports, agriculture, forêts, industries, bâtiments](#), Agence de la transition écologique, coll. « Horizons », mars, 29 p., ici p. 28

¹⁶⁶ COACCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.

¹⁶⁷ JRC (2020), [Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report](#), Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.

Projections de l'évolution des coûts liée aux catastrophes naturelles pour les assurances

Le secteur assurantiel a proposé plusieurs estimations de l'évolution des coûts des catastrophes naturelles liée au changement climatique : la modification en fréquence et en intensité des épisodes de grêle, d'inondation, de sécheresse (essentiellement le retrait-gonflement des argiles) ou de submersion marine pourrait en effet augmenter la charge des sinistres couverts de manière substantielle. Cependant, ces impacts sont calculés sur l'ensemble des portefeuilles assurés : à côté des dommages causés aux bâtiments eux-mêmes (à usage résidentiel et à usage professionnel), sont parfois également pris en compte, selon les études, les biens qui s'y trouvent et les manques à gagner en cas d'inactivité (industrie, services, exploitations agricoles). Néanmoins, les logements privés constituent la majeure partie des portefeuilles assurés et du périmètre retenu par les études¹⁶⁸.

Plusieurs exercices de prospective ont été produits ces dernières années depuis la revue de l'Onerc de 2009 :

- En 2015, la CCR a étudié les implications d'un scénario RCP 4.5 sur le régime Cat Nat¹⁶⁹ à travers les aléas inondation, submersion marine et sécheresse. Les sinistres couverts par le régime doublent à l'horizon 2050 (passant d'un peu plus de un milliard d'euros annuel en 2015 à plus de 2 milliards en 2050) et 20 % de l'augmentation est due au changement climatique (soit 200 millions d'euros annuels supplémentaires en moyenne), le reste s'expliquant par l'augmentation des valeurs assurées ou leur répartition géographique¹⁷⁰.
- En 2015, la Fédération française de l'assurance, France Assureurs, prévoyait une augmentation des sinistres liés à la sécheresse, aux inondations, aux submersions marines ou aux tempêtes de 90 % à l'horizon 2040 dans le scénario RCP 8.5 (passant de 48 milliards d'euros indemnisés sur la période 1988-2013, soit 1,8 milliard en moyenne annuelle, à 92 milliards sur la période 2014-2039, soit 3,5 milliards annuels, en euros constants) : sur ces 90 %, 30 % seraient dus uniquement au climat (c'est-à-dire 13 milliards d'euros en cumulé, soit 500 millions d'euros de plus par an en moyenne), 43 % dus à l'augmentation globale des valeurs assurées (19 milliards d'euros en cumulé et 730 millions d'euros annualisés), 18 % dus à une agglomération des activités dans des zones à risque (9 milliards d'euros en cumulé et 350 millions d'euros annualisés) et 10 % à la variabilité naturelle du climat (4 milliards d'euros en cumulé et 150 millions d'euros annualisés)¹⁷¹.

¹⁶⁸ La décomposition des portefeuilles par type de valeur assurée n'est pas disponible dans toutes les études. Cependant, la publication de 2018 de la Caisse centrale de réassurance montre que plus des deux tiers des portefeuilles assurés correspondent aux risques des particuliers.

¹⁶⁹ La loi du 13 juillet 1982 a instauré un régime spécial d'indemnisation des catastrophes naturelles, dit « régime Cat Nat ». Cette loi impose aux assurances d'indemniser les victimes de catastrophes. Sont couverts « tous les dommages matériels directs non assurables ayant eu pour cause déterminante l'intensité anormale d'un agent naturel lorsque les mesures habituelles à prendre pour prévenir ces dommages n'ont pu empêcher leur survenance ou n'ont pu être prises » (article L125-1 du Code des assurances). Voir « [Quelle prévention des risques naturels en France ?](#) », *Vie-publique.fr*, article du 31 août 2021.

¹⁷⁰ CCR (2015), « [Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes naturelles](#) », étude, Caisse centrale de réassurance, décembre, 32 p.

¹⁷¹ Association française de l'assurance (2015), « [Risques climatiques : quel impact sur l'assurance contre les aléas naturels à l'horizon 2040 ?](#) », synthèse de l'étude, 32 p.

- En 2018, la CCR réactualise son étude de 2015 : à enjeux assurés identiques, à l'horizon 2050 et sous l'hypothèse du scénario RCP 8.5, le dérèglement climatique serait à l'origine d'une augmentation de 35 % des sinistres Cat Nat. Une désagrégation du résultat par sinistre est proposée : + 23 % d'augmentation de la charge sécheresse, + 38 % pour les inondations, + 82 % pour les submersions marines et l'augmentation du niveau des mers. De plus, le ratio sinistres/primes augmente de plus de 50 %, dont 35 % seraient dus à l'accroissement de la fréquence et de la sévérité des événements extrêmes et 15 % à la concentration dans les zones à risque. Les auteurs soulignent la vulnérabilité du littoral atlantique, de l'Île-de-France et du pourtour méditerranéen¹⁷².
- En 2021, France Assureurs reproduit son exercice de 2015 avec un scénario RCP 8.5 et conclut à une augmentation de 93 % des dégâts cumulés à l'horizon 2050 (passant de 74,1 milliards d'euros indemnisés sur la période 1989-2019, soit 2,4 milliards de moyenne annuelle, à 143 milliards sur la période 2020-2050, soit 4,6 milliards annuels¹⁷³, en euros constants), dont 35 % (soit 23,8 milliards d'euros en cumulé et 765 millions d'euros par an) seraient dus au changement climatique par le biais des risques de sécheresse, d'inondation et de submersion marine. L'augmentation des valeurs assurées compte pour 53 % de l'augmentation, la variabilité naturelle pour 7 % et de répartition géographique pour 5 %. L'effet lié au changement climatique se répartit selon les différents aléas naturels, avec une forte prépondérance pour la sécheresse : + 555 millions d'euros par an pour la sécheresse, + 100 millions d'euros pour les inondations, + 110 millions d'euros pour les submersions. En ce qui concerne la sécheresse et le retrait-gonflement des argiles, les auteurs précisent que les départements qui contribueront le plus à cette hausse seront la Haute-Garonne (23 %), la Gironde (19 %), les Bouches-du-Rhône, le Tarn-et-Garonne et le Tarn (8 %)¹⁷⁴. À titre de comparaison, l'Onerc chiffrait en 2009 entre 480 et 1 080 millions d'euros (selon le niveau de réchauffement) l'augmentation du coût moyen annuel pour les sinistres dus à la sécheresse et au retrait-gonflement des argiles à l'horizon 2100¹⁷⁵. Cela peut être mis en parallèle de l'estimation de France Assureurs, pour laquelle les dommages liés à l'accroissement du retrait-gonflement des argiles passeront de 450 millions d'euros par an sur la période 1989-2019 à 1,3 milliard d'euros sur 2020-2050, et 62 % de cette hausse serait due au changement climatique. On pourra se rapporter à la fiche « [Risques littoraux](#) » pour plus de détails sur l'évolution des dommages dus au risque de submersion marine.
- En 2022, le groupe d'assurance Covéa revoit à la hausse les résultats précédents (en prenant en compte le scénario RCP 8.5), la charge des sinistres augmentant de 60 %, à l'horizon 2050, du fait du seul réchauffement climatique : + 60 % de charges dues aux sécheresses, + 20 % à la grêle, + 110 % aux inondations de plaine et + 130 % aux inondations éclair et aucune augmentation pour les tempêtes. Covéa attribue cette différence à : (1) l'utilisation d'une palette de modèles climatiques plus large, (2) l'alignement de l'étude sur les critères réglementaires retenus dans le cadre

¹⁷² CCR et Météo-France (2018), « [Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050](#) », étude, septembre, 31 p.

¹⁷³ À noter que cette moyenne annuelle cache une probable augmentation progressive des coûts dans le temps.

¹⁷⁴ France Assureurs (2021), « [Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050](#) », étude, octobre, 30 p.

¹⁷⁵ Onerc (2009), [Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation](#), Paris, La Documentation française, 194 p.

du régime Cat Nat, (3) l'usage de modèles de dommages calibrés à partir de leurs portefeuilles et de leur propre expérience des sinistres. Si on traduit ces pourcentages à l'aide des montants des dommages sur la période 1989-2019 présentés par la FFA, cela revient *a minima* à une augmentation de un milliard d'euros annualisé, strictement due au changement climatique. L'étude souligne par ailleurs que l'augmentation des sinistres pèse plus sur le régime Cat Nat (inondations et sécheresses) que sur les autres types d'assurances comparables (tempêtes et grêles) : ainsi, le rapport des charges de sinistres Cat Nat sur les charges liées aux contrats Tempête, grêle et neige (TGN) passe de 57/43 aujourd'hui à 70/30 en 2050¹⁷⁶.

On remarque que les différentes études ne s'accordent pas sur le risque qui s'intensifiera le plus (sécheresses, inondations ou submersions marines). Enfin, puisque les modèles climatiques ne prévoient pas d'augmentation en fréquence ou en intensité des épisodes de tempête, toutes ces études remarquent que les sinistres liés à cet aléa ne devraient pas s'accroître du fait du changement climatique.

Comme les résultats de ces études ne sont pas détaillés à un niveau désagrégé selon la nature des biens assurés (logements, locaux professionnels, pertes d'exploitation liées à une activité agricole, industrielle ou de service, biens mobiles), il n'est pas possible de spécifier l'impact du changement climatique sur chaque catégorie de biens. De plus, ces résultats doivent être considérés à l'aune du fait que, selon le Haut Conseil pour le climat (HCC), seules 35 % des activités sensibles aux aléas climatiques sont aujourd'hui assurées¹⁷⁷. À titre d'illustration, le réassureur allemand Munich Re évalue le coût des inondations qui ont frappé l'Europe du Nord en juillet 2021 à 46 milliards d'euros, dont seulement 11 milliards portaient sur des actifs assurés¹⁷⁸.

Il apparaît que les répercussions éventuelles de l'augmentation des sinistres sur les coûts des assurances pourraient se traduire par différents comportements : par exemple, une augmentation des primes d'assurance, et donc un effet sur la valeur des actifs assurés ; un renoncement à l'assurance par certains acteurs ; ou encore un refus d'assurer de la part des assureurs¹⁷⁹. En particulier, les impacts sur les populations les plus vulnérables devraient être évalués.

¹⁷⁶ Covéa et RiskWeatherTech (2022), « [Changement climatique et assurance : quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?](#) », livre blanc, janvier, 43 p.

¹⁷⁷ HCC (2021), [Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation](#), Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 183 p.

¹⁷⁸ Munich Re (2022), « [World map of natural disasters 2021](#) », janvier.

¹⁷⁹ Chneiweiss A. et Bardaji J. (2020), [Les assureurs face au défi climatique](#), étude, Fondapol, août, 52 p.

9. Tourisme

Le rapport d'information du Sénat¹⁸⁰ identifiait un certain nombre de canaux par lesquels le changement climatique pourrait impacter le secteur du tourisme :

- le tourisme hivernal de la montagne, surtout en moyenne montagne (et particulièrement dans les massifs non alpins), sera impacté par la baisse attendue de l'enneigement ;
- le tourisme nautique des bords de mer, des lacs et des rivières pourrait être impacté par la raréfaction des eaux de surface et par des problèmes sanitaires liés à la montée des températures (comme le développement de cyanobactéries rendant les eaux impropres à la baignade) ;
- les canicules et fortes chaleurs pourraient avoir un impact négatif sur les centres touristiques urbains soumis à des effets d'îlots de chaleur ;
- la forte hausse des températures estivales dans les zones méridionales pourrait entraîner un déplacement des flux touristiques estivaux vers des zones plus tempérées, comme la Bretagne, le littoral de la Manche ou les zones de montagne ;
- l'accentuation des tensions sur la ressource en eau pourrait constituer un frein au développement touristique dans les zones touristiquement attractives mais en situation de stress hydrique ;
- la montée des eaux littorales menace enfin certaines zones touristiques littorales, par exemple en dégradant ou en faisant disparaître des plages, voire en posant la question du repli des zones urbanisées de certaines communes littorales – comme Lacanau.

Néanmoins, comme ce même rapport l'indique, « les études, et notamment les exercices de prospective, dans le secteur du tourisme, sont pour l'instant à la fois rares et incomplets¹⁸¹ ». La seule exception est le secteur du tourisme de ski, détaillé ci-dessous¹⁸². Le fait que la prospective climatique soit plus limitée sur les autres types de tourisme ne permet pas de faire émerger une vision globale de l'exposition quantitative du secteur. Signalons néanmoins qu'en ce qui concerne l'impact des conditions météorologiques sur le tourisme, l'Onerc remarquait en 2009 que les départements, dont l'indice climato-touristique de Mieczkowski¹⁸³ diminuerait de 25 % à l'horizon 2100 dans le scénario A1B du deuxième rapport du Giec (approximativement équivalent au scénario RCP 6.0)¹⁸⁴, représentent aujourd'hui un chiffre d'affaires touristique de plus de 10 milliards d'euros sur la saison estivale et que ceux où la baisse serait comprise entre 10 % et 25 % représentent plus de 18 milliards d'euros¹⁸⁵.

¹⁸⁰ Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

¹⁸¹ *Ibid.*, p. 61.

¹⁸² Un service a été développé par le consortium de Météo-France, l'Inrae et Dianeige pour adapter la stratégie touristique et les programmes d'investissements structurants des stations et territoires de montagne au changement climatique et aux projections de l'évolution de l'enneigement : <https://www.climsnow.com/>

¹⁸³ L'indice climato-touristique de Mieczkowski varie de - 30 à 100 et permet de définir si un climat est favorable ou non au tourisme à partir de six variables climatiques mensuelles (températures maximale et moyenne, humidité relative, précipitations, durée d'ensoleillement, vitesse du vent).

¹⁸⁴ Voir Ministère de la Transition écologique (s.d.), « [Drias, les futurs du climat – Les scénarios RCP](#) ».

¹⁸⁵ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p. À titre de comparaison, la consommation touristique intérieure s'élevait à 145 milliards d'euros en 2011 selon l'Insee (voir Sourd C., Bisault L. et Lomonaco J.-C. [2014], « [Les dépenses des touristes en France](#) », *Insee Première*, n° 1510, juillet, 4 p.).

Perspectives climatiques dans le secteur du ski

Avec l'appui technique de Météo-France, Atout France a publié une étude sur les perspectives climatiques des massifs à l'horizon 2030-2080¹⁸⁶. Elle montre qu'en 2030, à 1 500 mètres d'altitude, seuls quelques massifs (le Jura, les Vosges, les Alpes du Nord et du Centre) pourraient encore disposer d'une couverture neigeuse assez épaisse, pendant une durée suffisante, pour garantir la pérennité de l'offre touristique hivernale. Même à 1 800 mètres, les Alpes méridionales et les Pyrénées (hormis dans leur partie occidentale) ne seraient pas tout à fait certains de disposer d'un manteau suffisant pour la pratique du ski.

Plus récemment, une étude sur les conséquences locales du changement climatique sur l'enneigement, citée dans le rapport du WWF sur le sport dans un monde à + 2 °C ou + 4 °C¹⁸⁷, indique que, avec un niveau de réchauffement global de + 2 °C, seules trois stations pourraient encore compter un enneigement naturel dans les Pyrénées, et la moitié des stations pyrénéennes ne pourraient fonctionner selon les critères actuels d'exploitation, même à l'aide de neige artificielle. Dans un scénario de réchauffement de + 4 °C, aucune station des Pyrénées ou des Alpes ne présenterait un enneigement naturel fiable : seulement une vingtaine de stations dans les Alpes pourraient fonctionner, sous condition d'enneigement artificiel, car l'épaisseur du manteau neigeux en hiver serait diminuée de 80 % (contre seulement 30 %, pour les Alpes, à + 2 °C)¹⁸⁸. À titre de comparaison, l'Onerc avançait un résultat plus optimiste en 2009, en s'appuyant sur une étude de l'OCDE : sur les 143 domaines skiables des Alpes françaises bénéficiant à l'époque d'un enneigement fiable, seulement 123 à + 1 °C, 96 à + 2 °C et 55 à + 4 °C seraient encore opérables¹⁸⁹.

¹⁸⁶ Atout France (2013), *Panorama du tourisme de la montagne (édition 2012-2013). Carnet n° 2 – L'emploi et les retombées économiques*, Paris, Éditions Atout France, 232 p.

¹⁸⁷ Spandre P., François H., Verfaillie D., Pons M., Vernay M., Lafaysse M., George E. et Morin S. (2019), « Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation », *The Cryosphere*, vol. 13(4), avril, p. 1325-1347, cité dans WWF (2021), *Dérèglement climatique. Le monde du sport à + 2 °C et + 4 °C*, rapport, juillet, 63 p.

¹⁸⁸ *Ibid.*

¹⁸⁹ OCDE (2006), *Changements climatiques dans les Alpes européennes. Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*, 136 p., rapporté dans Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

10. Santé

Les aléas météorologiques ont déjà des conséquences avérées sur la santé des populations. Ainsi les vagues de chaleur, régulières en été, sont toutes accompagnées de surmortalité¹⁹⁰ : + 1 739 décès en 2015, + 378 en 2016, + 474 en 2017, + 1 641 en 2018, + 1 462 en 2019, + 1 924 en 2020, + 239 en 2021 et + 2 816 en 2022. Le changement climatique, en accentuant ou en rendant plus fréquents les aléas météorologiques, peut donc lui aussi entraîner des effets sanitaires. Les vagues de chaleur causent une surmortalité, mais ont aussi d'autres conséquences : un accroissement de la fatigue, une perte d'attention, des symptômes cardiovasculaires, des troubles de la grossesse, une sollicitation accrue du système de santé (hausse des consultations médicales, des accidents du travail, des passages aux urgences ou des hospitalisations). L'augmentation moyenne des températures peut avoir des effets indirects, comme l'augmentation du risque lié à l'ozone, des allergies (pollen, par exemple), de la prolifération des algues ou des maladies vectorielles (chikungunya, dengue, zika, etc.). Enfin, les événements extrêmes (les inondations éclair, par exemple) peuvent aussi avoir des conséquences sanitaires. Par ailleurs, les travailleurs peuvent également être exposés aux conséquences du changement climatique dans le cadre de leur activité professionnelle, ce qui induit des risques sanitaires importants¹⁹¹.

Santé publique France a réalisé une évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020¹⁹². Le coût total sur la période est estimé entre 22 et 37 milliards d'euros, dont 16 à 30 milliards d'euros correspondent à des coûts intangibles liés à la mortalité. L'écart d'estimation provient de la méthode choisie : la mortalité est exprimée en années de vie perdues dans le premier cas, en nombre de décès en excès dans le second. Des pertes de bien-être sont causées par la restriction d'activité en journée de vigilance rouge canicule¹⁹³. Les recours aux soins représentent moins de 1 % du coût total (30,6 millions d'euros). Les impacts sur la productivité ne sont pas pris en compte.

Projections d'évolution des risques sanitaires liés aux vagues de chaleur

Évolution des températures et des épisodes de vague de chaleur

Les projections portent essentiellement sur l'augmentation moyenne des températures (Graphique 4) et les conséquences des vagues de chaleur. Le rapport Drias-2020 de Météo-France¹⁹⁴ apporte des éléments concernant l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur :

- en fin de siècle, en scénario RCP 2.6, l'évolution projetée correspond à un doublement du nombre de jours de vagues de chaleur tandis qu'en scénario RCP 4.5, il s'agit plutôt d'un facteur 3 à 4 et en scénario RCP 8.5 d'un facteur 5 à 10 ;

¹⁹⁰ Données Santé publique France.

¹⁹¹ Anses (2018), « Évaluation des risques induits par le changement climatique sur la santé des travailleurs ».

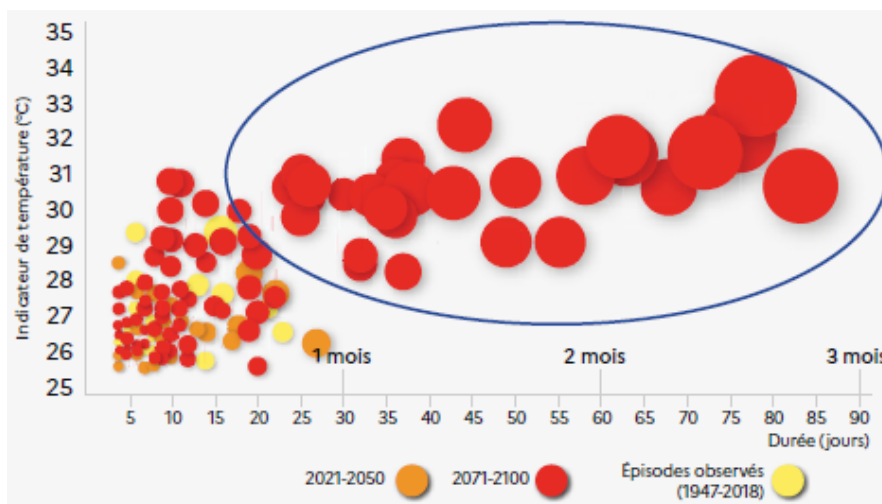
¹⁹² Adélaïde L., Chanel O. et Pascal M. (2021), « Évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020 », Santé publique France, *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, n° 12, p. 215-233.

¹⁹³ La restriction d'activité correspond à des périodes extrêmes de chaleur (deux jours en 2019 et quatre à cinq jours en 2020) et est évaluée à 43 euros par personne exposée et par jour d'activité restreinte, suivant plusieurs études internationales. Cette valeur est recommandée par Ready R., Navrud S., Day B. *et al.* (2004), « Benefit transfer in Europe: How reliable are transfers between countries? », *Environmental and Resource Economics*, n° 29, p. 67-82.

¹⁹⁴ Météo-France (2020), *Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole*, rapport, 97 p.

- du point de vue de la répartition géographique, avec un scénario RCP 8.5, le nombre de vagues de chaleur estivales augmente régulièrement au cours du siècle : en moyenne jusqu'à dix à vingt jours supplémentaires et près des côtes de l'Atlantique et de la Manche de vingt à trente-cinq jours. Le quart sud-est de la France est la zone la plus exposée à l'augmentation de cet aléa ;
- en parallèle, Météo-France nous renseigne sur l'évolution du nombre de jours de vagues de froid ou de gelée, qui est en baisse dans tous les scénarios avec une intensité dépendant fortement du scénario et de l'horizon temporel. Cette diminution est plus forte dans les régions actuellement les plus froides (dans l'est de la France et les zones de montagne). En fin de siècle, le nombre de jours de vagues de froid pourrait être divisé par deux avec un scénario RCP 2.6 mais se réduire à un jour par an en moyenne en scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. À l'identique, le nombre de journées de gel pourrait être divisé par deux en scénario RCP 2.6 tandis qu'en scénario RCP 4.5 et RCP 8.5, les gelées pourraient devenir un événement rare.

Graphique 4 – Simulation des vagues de chaleur, en durée et en température au cours du XXI^e siècle



Taille de la bulle : sévérité de la vague de chaleur (chaleur cumulée).

N.B. Ces vagues de chaleur (durée de un à trois mois) apparaissent à la fin du XXI^e siècle dans un scénario sans réelle politique climatique. Elles pourraient survenir trois années sur quatre.

Lecture : à l'horizon 2071-2100, les vagues de chaleur seront plus longues (elles pourront atteindre trois mois) et plus intenses (systématiquement autour des trente degrés Celsius).

Source : Ademe (2021), *Transition(s) 2050. Choisir maintenant, agir pour le climat, rapport, coll. « Horizons », novembre, 685 p., ici p. 65* (d'après Météo-France – Climat HD)

Nombre de décès causés par les vagues de chaleur

Les estimations précédentes sont formulées en termes physiques, c'est-à-dire en nombre de jours de vagues de chaleur, mais l'évaluation complète du risque sanitaire demande de transcrire en termes économiques ou humains ces projections. Au niveau européen, le Giec¹⁹⁵ propose une estimation des conséquences des vagues de chaleur :

- à + 1,5 °C, il pourrait y avoir 30 000 décès annuels pour cause de chaleur extrême, avec une multiplication par trois de ce chiffre à + 3 °C ;
- le nombre d'admissions à l'hôpital pour des problèmes respiratoires en lien avec la chaleur doit augmenter de 11 000 (1981-2010) à 26 000 personnes par an,

¹⁹⁵ Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février.

particulièrement dans le sud de l'Europe, et notamment à cause de l'augmentation du nombre de jours d'extrême chaleur ;

- 74 % des Européens vivent dans des aires urbaines, où l'effet des vagues de chaleur est accentué : la stabilisation du climat à + 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C pourrait diminuer de 15 % à 22 % le nombre de morts prématurées en été.

Toujours au niveau européen, le programme de recherche COACCH propose plusieurs estimations de la surmortalité due à l'augmentation des températures : le nombre de morts dus à la chaleur (en considérant à la fois les épisodes de chaleur modérée et de vagues de chaleur) passerait de 100 000 décès annuels aujourd'hui à 300 000 décès (RCP 8.5). Les vagues de chaleur compteraient pour 40 % à 50 % de ce total. Le programme de recherche Peseta IV quantifie le nombre annualisé de décès dans l'Union européenne dus aux seules vagues de chaleur intense¹⁹⁶ : alors qu'aujourd'hui seulement 2 700 morts sont à déplorer tous les ans en moyenne, les auteurs anticipent 30 000 à 50 000 décès annuels à l'horizon 2050 à + 1,5 °C et + 2 °C respectivement, voire 90 000 à + 3 °C en 2100.

Au niveau français, le rapport du Sénat propose, avec l'aide de Santé publique France, une quantification des impacts sanitaires du changement climatique dans le cadre de la surmortalité attribuable aux températures¹⁹⁷ :

- en 2050, dans le scénario optimiste de réduction des émissions de gaz à effet de serre (RCP 2.6), la mortalité attribuable à la température représenterait seulement 0,1 % des décès. Ce chiffre serait dix fois plus élevé (soit 1 %) dans le cas du scénario RCP 8.5 ;
- vers 2090, le taux de décès imputable aux températures serait de 0,2 % dans le scénario RCP 2.6 et serait vingt fois plus élevé dans le scénario RCP 8.5 (soit 4 %).

Ces résultats sont fondés sur une étude statistique d'ampleur mondiale, mais où les relations température-mortalité utilisées sont évaluées au niveau local (18 points de mesure différents sont utilisés pour la France métropolitaine). L'étude rend compte à la fois de la diminution du nombre de décès liés aux vagues de froid et de l'augmentation du nombre de décès liés aux vagues de chaleur. Les évolutions démographiques à venir ou une éventuelle adaptation ne sont pas prises en compte.

Exposition aux risques sanitaires liés aux vagues de chaleur dans les logements

Étant donné l'aspect central de l'adaptation des logements aux normes du confort d'été pour prévenir les risques sanitaires dus aux vagues de chaleur, on peut se demander quelle part du parc de logements est la plus exposée. Selon l'Ademe¹⁹⁸, 450 000 des 700 000 hectares de logements du parc présenteraient un risque important et 250 000 hectares un risque passable. En 2050, suivant une trajectoire correspondant au RCP 4.5, un risque

¹⁹⁶ Une vague de chaleur est considérée comme intense dans ce travail si elle se produit tous les cinquante ans au climat actuel.

¹⁹⁷ Chiffres fournis par Santé publique France, d'après Gasparrini A., Guo Y., Sera F. *et al.* (2017), « [Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios](#) », *The Lancet Planetary Health*, vol. 1(9), décembre, p. e360-e367, rapportés par Sénat (2019), *Adaptation la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

¹⁹⁸ Ademe (2022), *Feuilleton Transition(s) 2050. Adaptation au changement climatique : transports, agriculture, forêts, industries, bâtiments*, Agence de la transition écologique, coll. « Horizons », mars, 29 p.

« très important » apparaîtrait sur 200 000 hectares (soit environ 28 % du parc), alors que ce risque concernerait 450 000 hectares (soit 64 % du parc) dans le cas du RCP 8.5. Ces chiffres quantifient l'exposition du parc de logements, qu'il soit composé de logements isolés ou non.

Effets sur la productivité du travail

Les effets des fortes chaleurs sur la productivité du travail peuvent être considérés comme des effets indirects sur la santé lorsqu'ils limitent la capacité à travailler (pas lorsqu'ils sont liés à un arrêt de travail du fait des fortes chaleurs). De plus, ces effets concernent la population active, et de manière non homogène. Cet impact n'est pas homogène sur l'ensemble de la population active. En France, 36 % des travailleurs ont déclaré en 2019 que leur travail ou leur lieu de travail présente un inconvénient en raison d'une température élevée, principalement dans les professions agricoles et du bâtiment¹⁹⁹. L'augmentation de la température peut également impacter le quotidien dans un cadre professionnel. Une étude récente²⁰⁰ montre qu'au niveau européen, les vagues de chaleur ont entraîné, du fait de leur impact sur la productivité du travail, une baisse du PIB moyenne de l'ordre de 0,2 % sur la période 1981-2010²⁰¹. Les vagues de chaleur des années 2003, 2010, 2015, 2018 et 2021 ont été 1,5 à 2,5 fois plus coûteuses que la moyenne précédente, chaque crise ayant représenté entre 0,3 % et 0,5 % du PIB européen, soit 1,5 à 2,5 fois plus que la moyenne de la période 1981-2010. Du fait de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur, ces pertes annualisées pourraient s'élever à 0,96 % du PIB sur la période 2045-2055 et dépasser 1,14 % sur la période 2060-2070, dans le scénario RCP 8.5. Néanmoins, les pertes de productivité sont spatialement hétérogènes, le pourtour méditerranéen étant particulièrement touché : à l'horizon 2080, elles pourraient dépasser les 3 % dans le sud de la France, et atteindre jusqu'à 8 % en Espagne et en Grèce.

Impacts des vagues de chaleur sur l'activité physique et le sport

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur a un impact sur le nombre de jours au cours desquels l'activité physique ou la pratique sportive est déconseillée. La baisse de l'activité physique expose à terme à des risques sur la santé physique et mentale. En France, une étude commanditée par WWF²⁰² a évalué le nombre de jours au cours desquels la pratique sportive sera déconseillée (au-dessus de 32 °C) : il y aurait 24 jours de plus qu'aujourd'hui à + 2 °C et 66 jours de plus à + 4 °C. De même que pour les logements, se pose la question de l'adaptation des infrastructures sportives à ces vagues de chaleur plus fréquentes (50 % des salles de pratique collective française ont été construites avant 1987 et sont inadaptées aux fortes températures).

¹⁹⁹ Enquête *Conditions de travail* 2019, pilotée par la Dares.

²⁰⁰ Szewczyk W., Mongelli I. et Ciscar J.-C. (2021), « [Heat stress, labour productivity and adaptation in Europe: A regional and occupational analysis](#) », *Environmental Research Letters*, vol. 16(10).

²⁰¹ Garcia-León D., Casanueva A., Standardi G., Burgstall A., Flouris A. D. et Nybo L. (2021), « [Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe](#) », *Nature Communications*, n° 12, octobre.

²⁰² WWF (2021), *Dérèglement climatique. Le monde du sport à + 2 °C et + 4 °C*, rapport, juillet, 63 p.

Autres risques sanitaires du changement climatique

Les risques sanitaires autres que l'exposition directe à la chaleur n'ont pas, à notre connaissance, fait l'objet de quantification au niveau national. Néanmoins, au niveau mondial, au-delà du rapport du Giec, le *Lancet Countdown on health and climate change*²⁰³ synthétise la littérature sur les liens entre changement climatique et santé. À titre d'exemple, des indicateurs permettent de mesurer la transmissibilité d'une maladie infectieuse en un lieu selon des paramètres climatiques : entre 2011 et 2021, la zone côtière où la bactérie *Vibrio* (gastro-entérite, choléra, infections des plaies, sepsis) peut être transmise a augmenté de 35 % dans les pays baltes, de 25 % dans l'Atlantique Nord et de 4 % dans le Pacifique Nord-Ouest. De même, le taux de reproduction pour tous les arbovirus (dengue, chikungunya et zika) a augmenté entre la période 1950-1954 et 2020 : de + 13 % à + 7 % selon le vecteur. La plus grande augmentation en termes de potentiel épidémique concerne les pays d'indice de développement humain (IDH) élevé, dû à l'expansion géographique du moustique de type *Aedes*. Arrivé sur le territoire métropolitain en 2004, ce moustique pourrait être responsable d'une augmentation de la sinistralité sanitaire de + 119 % entre 2019 et 2050 en France métropolitaine (avec des conséquences plus marquées dans les grandes métropoles) d'après l'Autorité de contrôle prudentiel et de résolution (ACPR)²⁰⁴.

Au-delà des risques sur la santé physique du changement climatique, la santé mentale est une composante à ne pas négliger. Le *Lancet Countdown on health and climate change* pointe le besoin de lever les difficultés d'évaluation des effets du changement climatique sur la santé mentale. On peut citer à titre d'illustration les dommages psychologiques touchant les sinistrés des catastrophes naturelles. Il n'existe pas à notre connaissance d'évaluation sur l'évolution de ces risques psychologiques avec le changement climatique²⁰⁵ en France.

²⁰³ Romanello M., McGushin A., Di Napoli C. *et al.* (2021), « [The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Code red for a healthy future](#) », *The Lancet*, vol. 398(10311), octobre, p. 1619-1662.

²⁰⁴ Voir Onerc (2022), [La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 385 p.

²⁰⁵ On peut toutefois citer à titre d'illustration les travaux d'un groupe de travail piloté par le CGDD et France Stratégie qui a proposé une méthode d'évaluation des dommages psychologiques évités par les projets de prévention contre les inondations. À ce titre, le dommage moyen d'une personne souffrant d'état de stress post-traumatique suite à une inondation a été estimé entre 1 600 et 7 400 euros (dont une grande majorité correspond à des pertes de bien-être). Voir CGDD (2022), [Comment évaluer les dommages psychologiques évités par la prévention des inondations ?](#), coll. « Théma Essentiel – Santé », mars, 4 p.

Conclusion

Enseignements et perspectives

Bilan sur l'évaluation des risques climatiques

Un premier constat de cette revue porte sur la difficulté à comparer et synthétiser l'ensemble des études, notamment parce qu'elles se fondent sur des référentiels hétérogènes pour envisager les niveaux de réchauffement futurs. Si les RCP du Giec sont les principaux scénarios utilisés, plusieurs travaux récents évaluent les niveaux d'exposition futurs en fonction du niveau de réchauffement global (+ 2 °C en 2050 à l'échelle mondiale, par exemple).

Ensuite, il ressort que l'évaluation qualitative et quantitative des risques climatiques à l'échelle nationale s'est considérablement enrichie depuis le dernier état des lieux réalisé par l'Onerc²⁰⁶ en 2009. Les projections physiques régionalisées sont disponibles pour un certain nombre de variables impactées par le changement climatique : par exemple, les projections liées à la température locale sont mises à disposition des décideurs à travers l'outil Drias, et le projet Explore 2070 quantifie les futurs hydrologiques. De même, le niveau de risque exprimé en termes d'indicateurs socioéconomiques est mieux connu : certaines filières peuvent s'appuyer sur une prospective climatique (comme le tourisme de ski) et des premiers éléments de chiffrage quantifient l'exposition au risque à l'échelle nationale dans de nouveaux secteurs, comme pour les infrastructures et les littoraux.

Cependant, les évaluations n'aboutissent que dans peu de secteurs à une estimation de coûts globaux des dommages. Si les prospectives de l'assurance donnent une vision générale du risque climatique sur les logements, il est plus difficile de placer un ordre de grandeur des coûts du réchauffement climatique dans certains secteurs, comme l'agriculture, la forêt ou l'eau. Cela concerne également des secteurs où plusieurs éléments mènent à penser que les pertes seront particulièrement importantes. Par exemple la santé humaine, pour laquelle il n'existe pas d'évaluation des coûts concernant spécifiquement les effets du changement climatique²⁰⁷, ou plus généralement l'évolution de la morbidité ou de la sollicitation du système de santé. Il en est de même pour la biodiversité, même si les travaux de quantification de l'Efese sont en cours. Il en résulte une difficulté à comparer les impacts, à prioriser l'adaptation et à provoquer l'action.

²⁰⁶ Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

²⁰⁷ En France, il existe une étude sur le coût de l'impact sur la santé de la pollution de l'air (Sénat, 2015, *Commission d'enquête sur le coût économique et financier de la pollution de l'air*), mais pas pour le coût du réchauffement climatique.

Au-delà de l'impact agrégé sur tel ou tel secteur, on trouve encore peu d'analyses en termes d'inégalité d'exposition et de vulnérabilité face au risque climatique. À titre d'illustration, la vulnérabilité, qui conditionne la capacité à s'adapter et la fragilité des personnes face aux vagues de chaleur par exemple, n'est pas la même pour tous²⁰⁸. De même, les impacts sur la productivité du travail seront plus importants pour les travailleurs en extérieur. Dans tous les cas, l'identification des populations particulièrement affectées est un enjeu fondamental.

Enfin, les risques interrégionaux sont souvent absents des analyses présentées ci-dessus. Le changement climatique affectera l'ensemble des pays du globe et pourra avoir des conséquences sur le territoire national par plusieurs canaux de transmission, par exemple en entraînant des risques de rupture des chaînes d'approvisionnement.

Renforcer l'approche territoriale des coûts de l'inaction

Plusieurs études menées à l'échelle nationale, notamment celles portant sur les infrastructures²⁰⁹ ou le secteur agricole²¹⁰, pointent la nécessité de territorialiser davantage l'analyse des coûts de l'inaction. Plus précisément, les auteurs soulignent la difficulté à chiffrer au niveau national les impacts du changement climatique, étant donné le caractère local des enjeux socioéconomiques, et appellent à encourager les travaux ultérieurs à se porter à cette échelle.

Ce besoin est d'ailleurs intégré dans le Code de l'environnement, qui précise que dans le cadre des PCAET les stratégies territoriales doivent évaluer les coûts socioéconomiques des actions mises en place, ainsi que ceux d'une éventuelle inaction²¹¹. Cette maille est suffisamment restreinte pour permettre une analyse des enjeux liés aux infrastructures et bâtiments, aux activités économiques locales exposées (modèle agricole, usage de l'eau, filières particulières) et aux éventuels effets de santé (chaleur). À l'heure actuelle, les PCAET présentent des analyses de vulnérabilité relativement hétérogènes, appuyés sur de nombreux éléments qualitatifs, mais avancent peu de coûts de l'inaction, qui permettraient pourtant de prioriser les chantiers et de donner une idée de l'urgence.

Ces exercices peuvent s'appuyer sur des référentiels méthodologiques et des outils pour l'évaluation des risques mis à disposition par l'échelon national :

- le travail du Cerema²¹² sur une méthodologie d'évaluation des coûts de l'inaction pourrait ainsi servir de base à une analyse quantitative plus systématique, en complément aux vingt-neuf indicateurs déjà suivis par l'Onerc (plus tournés vers des mesures physiques)²¹³ ;
- l'outil Drias de Météo-France cartographie les projections climatiques régionalisées sur le territoire ;

²⁰⁸ Santé publique France (2019), « Les individus sont-ils tous égaux face à la chaleur ? », 13 juin.

²⁰⁹ Carbone 4 (2021), *Le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France*, rapport complet, décembre, 105 p.

²¹⁰ CGAAER (2022), *Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires*, rapport n° 21044, avril, 117 p.

²¹¹ Voir l'article R229-51 du Code de l'environnement.

²¹² Cerema (2021), *Le coût de l'inaction face au changement climatique et à la pollution de l'air. Proposition de méthodologie d'évaluation*, rapport d'étude, décembre.

²¹³ Voir <https://www.ecologie.gouv.fr/observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc>.

- la démarche TACCT (« Trajectoires d'adaptation au changement climatique des territoires²¹⁴) de l'Ademe soutient les collectivités dans l'élaboration de leur politique d'adaptation.

Le développement récent d'outils de diagnostic²¹⁵ et de méthodologies sectorielles²¹⁶ offre également un cadre propice à ces démarches. De tels référentiels nécessiteront cependant d'être régulièrement mis à jour afin d'intégrer l'amélioration des connaissances sur les effets du changement climatique²¹⁷ et le cadrage pourrait être précisé dans certains secteurs²¹⁸. Les productions des groupes régionaux d'expertise sur le climat (Grec), adaptées à l'échelle locale, pourraient également être mobilisées²¹⁹.

En retour, l'agrégation d'analyses de vulnérabilité quantifiées à l'échelle locale permettrait d'informer une vision nationale des impacts, rendue nécessaire par les exigences de *reporting* au niveau européen et dans le cadre de l'Accord de Paris. Pour ce faire, des indicateurs pourraient être choisis pour standardiser la remontée d'informations et leur agrégation.

Enfin, atténuation et adaptation doivent être liées dans ces analyses. En effet, les impacts du changement climatique peuvent se calculer à différents niveaux d'atténuation à l'échelle mondiale, et l'analyse des coûts des dommages et celle des coûts de la décarbonation sont liées sur certains points : à titre d'illustration, l'accroissement des puits de carbone forestier peut augmenter les enjeux exposés aux dommages et la diminution du cheptel peut alléger la tension sur la ressource en eau et donc le coût d'un épisode de sécheresse.

La connaissance des impacts du changement climatique doit être améliorée à tous les maillons de la chaîne de causalité, et en priorité à la maille territoriale. Cela étant dit, au regard de la complexité des transformations envisagées, les choix de politique publique devront se montrer robustes face aux incertitudes intrinsèques aux différents exercices de prospective. En tout état de cause, les besoins en matière d'évaluation des impacts ne doivent pas retarder la mise en œuvre des actions d'adaptation : dès lors que des actions dites « sans regret » ont pu être identifiées²²⁰, celles-ci peuvent être déployées sans délai.

²¹⁴ Voir <https://tacct.ademe.fr/>

²¹⁵ On peut citer par exemple [Canari](#) pour l'agriculture ou [Bioclimsol](#) pour la foresterie.

²¹⁶ L'analyse de la vulnérabilité des infrastructures peut par exemple s'appuyer sur les méthodologies du Cerema. Voir par exemple : Cerema (2019), [Vulnérabilités et risques. Les infrastructures de transport face au climat](#), rapport d'étude, coll. « Connaissance », novembre, 526 p.

²¹⁷ Par exemple, le projet Climator dans le secteur de l'agriculture, qui sert de base aux services climatiques locaux, date de 2010-2012.

²¹⁸ Par exemple, la nécessité d'un guide méthodologique national à destination des gestionnaires d'infrastructures portuaires et fluviales et d'un référentiel de niveau de réchauffement a été soulignée dans un récent rapport de l'IGEDD et de l'IGAM. Voir IGEDD et IGAM (2022), [L'adaptation au changement climatique des gestionnaires d'infrastructures de navigation maritime et fluviale en France](#), rapport, octobre, 182 p.

²¹⁹ Les Grec sont des groupes scientifiques visant à faciliter et à favoriser la prise en compte des recherches et connaissances scientifiques sur le climat et la biodiversité. Voir par exemple les Grec en [Provence-Alpes-Côte d'Azur](#), le Grec [francilien](#), ou encore le comité scientifique régional sur le changement climatique ([Acclimatera](#)).

²²⁰ Voir Dépoues V., Dolques G. et Nicol M. (2022), [Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France. De combien parle-t-on ?](#), étude, I4CE, juin, 66 p.

Bibliographie

Chapitre 1

- Banque de France (2020), « [Le “Cygne vert” : les banques centrales à l'ère du risque climatique](#) », *Le Bulletin de la Banque de France*, n° 229, juin, 15 p.
- Cerema (2021), [Le coût de l'inaction face au changement climatique et à la pollution de l'air. Proposition de méthodologie d'évaluation](#), rapport d'étude, décembre.
- Comité21 (2022), [Guide sectoriel de l'adaptation aux changements climatiques](#), juin, 70 p.
- Deloitte (2021), [France's Turning Point. Accelerating New Growth on the Path to Net Zero](#), octobre, 40 p.
- Dépoues V., Dolques G. et Nicol M. (2022), [Se donner les moyens de s'adapter aux conséquences du changement climatique en France. De combien parle-t-on ?](#), étude, I4CE, juin, 66 p.
- Giec (2022), [Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change](#), sixième rapport du Giec, contribution du groupe III, avril (chapitre 3).
- Giec (2014), [Climate Change 2013. The Physical Science Basis](#), cinquième rapport du Giec, contribution du groupe I.
- Hausfather Z. (2019), « [Explainer: The high-emissions “RCP8.5” global warming scenario](#) », *CarbonBrief.org*, article du 21 août.
- Kemp L., Xu C., Depledge J. et al. (2022), « [Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios](#) », *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 119(34), août.
- Météo-France (2020), « [Le changement climatique en France](#) », 28 février.
- Ministère de la Transition écologique (2022), « [Chiffres clés du climat. France, Europe et Monde – Édition décembre 2022](#) », *Datalab – Climat*, décembre, 106 p.
- Network for Greening the Financial System (2019), « [A call for action Climate change as a source of financial risk – Executive Summary](#) », avril, 8 p.
- O'Neill B. C., Kriegler E., Ebi K. L. et al. (2017), « [The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century](#) », *Global Environmental Change*, n° 42, janvier, p. 169-180.
- Piontek F., Drouet L., Emmerling J. et al. (2021), « [Integrated perspective on translating biophysical to economic impacts of climate change](#) », *Nature Climate Change*, vol. 11, juin, p. 563-572.
- Ribes A., Boé J., Qasmi S., Dubouisson B., Douville H. et Terray L. (2022), « [An updated assessment of past and future warming over France based on a regional observational constraint](#) », *Earth System Dynamics*, vol. 13(4), octobre, p. 1397-1415.

Stern N. (2007), *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge, Cambridge University Press, 712 p.

Swiss-Re (2021), *The Economics of Climate Change: No Action Not an Option*, avril, 30 p.

Vailles C. (2021), « D'où viennent les cinq nouveaux scénarios du Giec ? », I4CE, Billet d'analyse, septembre.

Chapitre 2

Ressource en eau

JRC (2020), *Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.

Météo-France (2011), *Projet ClimSec. Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*, rapport final, mai, 72 p.

Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'Énergie (2012), « [Explore 2070](#) ».

Ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'Énergie (2012), « [Explore 2070. Hydrologie souterraine – synthèse](#) », octobre, 184 p.

Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022), « [Évolutions de la ressource en eau renouvelable en France métropolitaine de 1990 à 2018](#) », *Datalab – Environnement*, juin, 64 p.

Ministère de la Transition écologique (2020), « [Eaux et milieux aquatiques. Les chiffres clés – Édition 2020](#) », *Datalab – Environnement*, décembre, 128 p.

Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

Agriculture

Ademe (2012), *Livre Vert du projet Climator (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, 334 p.

Agreste (2021), « [Abricot 1/4 – En 2021, le gel historique d'avril ampute fortement la production d'abricots](#) », *Agreste Conjoncture*, n° 2021-052, mai, 4 p.

Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F. X. et Huard F. (2010), « [Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France](#) », *Field Crops Research*, vol. 119(1), octobre, p. 201-212.

CGAAER (2022), *Évaluation du coût du changement climatique pour les filières agricoles et alimentaires*, rapport n° 21044, avril, 117 p.

CGAAER (2017), *Eau, agriculture et changement climatique. Statu quo ou anticipation ? Synthèse et recommandations*, Conseil général de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces ruraux, rapport n° 16072, juin, 66 p.

CGAAER et CGEDD (2020), *Changement climatique, eau, agriculture. Quelles trajectoires d'ici 2050 ?*, rapport, juillet, 333 p.

- CGDD (2022), « [Les prélèvements d'eau douce par usages et par ressources](#) », Commissariat général au développement durable, octobre.
- COACCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.
- Duru M., Aubert P. M., Couturier C. et Doublet S. (2021), « [Scénarios de systèmes alimentaires à l'horizon 2050 au niveau européen et français : quels éclairages pour les politiques publiques ?](#) », *Revue AE&S*, vol. 11(1), juin, p. 38-57.
- FAO (2019), *State of the World Biodiversity for Food and Agriculture*, Organisation pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 572 p.
- HCC (2021), *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 183 p.
- Inrae (2020), « [Blé tendre et sécheresse : de nouvelles variétés à venir](#) ».
- JRC (2020), *Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2022), « [Conclusions du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique](#) », dossier de presse, 1^{er} février, 25 p.
- Onerc (2022), *La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 385 p.
- Réseau Action Climat (2014), *Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Recueil d'expériences territoriales*, septembre, 58 p.
- Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

Forêt

- Ademe (2012), *Livre Vert du projet Climator (2007-2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, Agence de la transition écologique, juin, 334 p.
- Callendar (2022), « [Feux de forêt. Effets du changement climatique sur l'exposition des installations Seveso](#) », étude, juillet, 14 p.
- CGDD (2018), *EFESE – Les écosystèmes forestiers*, coll. « Théma Analyse – Biodiversité », octobre, 449 p.
- CGEDD, CGAAER et IgF (2010), *Rapport de la mission interministérielle Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêt*, rapport final, juillet, 190 p.
- Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février.
- HCC (2022), *Dépasser les constats, mettre en œuvre les solutions*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 216 p.
- IGN (2022), « [Inventaire forestier national. Mémento, édition 2022](#) », Institut national de l'information géographique et forestière, 68 p.

- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (2020), « [Feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique. Agir pour des forêts résilientes et un maintien des services qu'elles rendent](#) », décembre, 26 p.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt et Ecofor (2014), [Projet SICFOR. Du suivi aux indicateurs de changement climatique en forêt – Rapport final](#), mars, 102 p.
- Onerc (2018), [Les évènements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 199 p.
- Onerc (2014), [L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 182 p.
- Onerc (2009), [Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation](#), Paris, La Documentation française, 194 p.
- Roux A., Colin A., Dhôte J.-F. et Schmitt B. (2020), [Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique. Entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie](#), Paris, Quae, 152 p.
- Sénat (2022), [Feux de forêt et de végétation. Prévenir l'embrasement](#), rapport d'information de M. Jean Bacci, Mme Anne-Catherine Loisier, MM. Pascal Martin et Olivier Rietmann, fait au nom de la commission de l'aménagement du territoire et du développement durable et de la commission des affaires économiques, août.
- Sénat (2019), [Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée](#), rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.

Risques littoraux

- Ademe (2022), [Feuilleton Transition\(s\) 2050. Adaptation au changement climatique : transports, agriculture, forêts, industries, bâtiments](#), Agence de la transition écologique, coll. « Horizons », mars, 29 p.
- Callendar (2022), « [Immobilier et climat. Le marché français face au risque de submersion](#) », étude, février, 15 p.
- Cerema (2020), [Connaissance du trait de côte. Évaluation prospective des enjeux affectés par le recul du trait de côte](#), rapport d'étude, coll. « Connaissance », janvier, 23 p.
- COACCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.
- France Assureurs (2021), « [Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050](#) », étude, octobre, 30 p.
- Giec (2022), [Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability](#), sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).
- IgA, CGEDD et IgF (2019), [Recomposition spatiale des littoraux](#), rapport, mars, 233 p.
- JRC (2020), [Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report](#), Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.
- Onerc (2009), [Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation](#), Paris, La Documentation française, 194 p.

Biodiversité

- Bouchet V., Bourcet C., Cécillon E. et Lavaud S. (2021), « [Évaluations économiques des services rendus par la biodiversité](#) », DG Trésor, *Trésor-Éco*, n° 294, décembre, 12 p.
- CGDD (2020), *Du constat à l'action. Rapport de première phase de l'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques*, Paris, La Documentation française, 266 p.
- CGDD (2016), *EFESE – Le service de pollinisation*, coll. « Théma Essentiel – Biodiversité », juin, 4 p.
- Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février.
- IGEDD et IgF (2022), *Le financement de la stratégie nationale pour la biodiversité (SNB) pour 2030*, rapport, novembre, 416 p.
- IPBES (2019), *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, 1148 p.
- IPBES et Giec (2021), « [IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change](#) », juin, 24 p.
- WWF (2018), *La nature face au choc climatique. L'impact du changement climatique sur la biodiversité au cœur des Écorégions Prioritaires du WWF*, mars, 44 p.

Énergie (offre et demande d'électricité)

- COACC (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACC Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.
- Cour des comptes (2023), *L'adaptation au changement climatique du parc de réacteurs nucléaires*, Communication à la commission des finances du Sénat, mars, 116 p.
- Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).
- JRC (2020), *Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.
- JRC (2018), *Climate Impacts in Europe: Final Report of the JRC Peseta III Project*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, 94 p.
- Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.
- RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050*, rapport complet, juin, 988 p.

Infrastructures et réseaux

- Bubeck P., Dillenardt L., Alfieri L., Feyen L., Thieken A. H. et Kellermann P. (2019), « [Global warming to increase flood risk on European railways](#) », *Climatic Change*, n° 155, avril, p. 19-36.

- Carbone 4 (2021), *Le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France*, rapport complet, décembre, 105 p.
- Cerema (2019), *Vulnérabilités et risques. Les infrastructures de transport face au climat*, rapport d'étude, coll. « Connaissance », novembre, 526 p.
- CGDD (2017), *Indisponibilité d'une infrastructure de transports. Mesurer et réduire les coûts*, coll. « Théma Analyse – Transport », octobre, 61 p.
- COACCH (2021), « *The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results* », Policy Brief, juillet, 20 p.
- Cour des comptes (2022), *L'entretien des routes nationales et départementales*, rapport publique thématique, mars, 139 p.
- Fant C., Boehlert B., Strzepek K., Larsen P., White A., Gulati S., Li Y. et Martinich J. (2020), « *Climate change impacts and costs to U.S. electricity transmission and distribution infrastructure* », *Energy*, n° 195, mars.
- Huibregtse E., Morales Napoles O., Hellebrandt L., Paprotny D. et de Wit S. (2016), « *Climate change in asset management of infrastructure: A risk- based methodology applied to disruption of traffic on road networks due to the flooding of tunnels* », *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 16(1), janvier, p. 98-113.
- Kocks E. E., van Ginkel K. C. H., van Marle M. J. E. et Lemnitzer A. (2022), « *Brief communication: Critical infrastructure impacts of the 2021 mid-July western European flood event* », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 22(12), novembre, p. 3831-3838.
- Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.
- Qiao Y., Dawson A. R., Parry T. et Flintsch G. W. (2015), « *Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs* », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, n° 41, décembre, p. 492-503.
- Rais Assa C., Faure A. et Gérardin M. (2022), « *Risques climatiques, réseaux et interdépendances : le temps d'agir* », France Stratégie, *La Note d'analyse*, n° 108, mai, 12 p.
- RTE (2022), *Futurs énergétiques 2050*, rapport complet, juin, 988 p.

Bâtiments

- Ademe (2022), *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*, Agence de la transition écologique, coll. « Expertises », octobre, 237 p.
- Association française de l'assurance (2015), « *Risques climatiques : quel impact sur l'assurance contre les aléas naturels à l'horizon 2040 ?* », synthèse de l'étude, 32 p.
- CCR (2015), « *Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles* », étude, Caisse centrale de réassurance, décembre, 32 p.
- CCR et Météo-France (2018), « *Conséquences du changement climatique sur le coût des catastrophes naturelles en France à horizon 2050* », étude, septembre, 31 p.

- CGDD (2021), « [Cartographie de l'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles](#) », note méthodologique, juin, 50 p.
- Chneiweiss A. et Bardaji J. (2020), *Les assureurs face au défi climatique*, étude, Fondapol, août, 52 p.
- COACCCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.
- Covéa et RiskWeatherTech (2022), « [Changement climatique et assurance : quelles conséquences sur la sinistralité à horizon 2050 ?](#) », livre blanc, janvier, 43 p.
- France Assureurs (2021), « [Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050](#) », étude, octobre, 30 p.
- Giec (2022), *Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability*, sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).
- HCC (2021), *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*, Haut Conseil pour le climat, rapport annuel, juin, 183 p.
- JRC (2020), *Climate Change Impacts and Adaptation in Europe: JRC Peseta IV Final Report*, Centre commun de recherche de l'Union européenne, mai, 66 p.
- Munich Re (2022), « [World map of natural disasters 2021](#) », janvier.
- Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.

Tourisme

- Atout France (2013), *Panorama du tourisme de la montagne (édition 2012-2013). Carnet n° 2 – L'emploi et les retombées économiques*, Paris, Éditions Atout France, 232 p.
- ANCT (2021), « [Accompagner en ingénierie les territoires de montagne vers une stratégie de développement touristique adaptée aux enjeux des transitions écologiques et de la diversification touristique](#) », Agence nationale de la cohésion des territoires, dossier de presse, 28 mai, 18 p.
- OCDE (2006), *Changements climatiques dans les Alpes européennes. Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels*, 136 p.
- Onerc (2009), *Changement climatique. Coûts des impacts et pistes d'adaptation*, Paris, La Documentation française, 194 p.
- Sénat (2019), *Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée*, rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.
- Spandre P., François H., Verfaillie D., Pons M., Vernay M., Lafaysse M., George E. et Morin S. (2019), « [Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation](#) », *The Cryosphere*, vol. 13(4), avril, p. 1325-1347.
- WWF (2021), *Dérèglement climatique. Le monde du sport à + 2 °C et + 4 °C*, rapport, juillet, 63 p.

Santé

- Adélaïde L., Chanel O. et Pascal M. (2021), « [Évaluation monétaire des effets sanitaires des canicules en France métropolitaine entre 2015 et 2020](#) », Santé publique France, *Bulletin épidémiologique hebdomadaire*, n° 12, p. 215-233.
- Ademe (2022), [Feuilleton Transition\(s\) 2050. Adaptation au changement climatique : transports, agriculture, forêts, industries, bâtiments](#), Agence de la transition écologique, coll. « Horizons », mars, 29 p.
- Ademe (2021), [Transition\(s\) 2050. Choisir maintenant, agir pour le climat](#), rapport, coll. « Horizons », novembre, 685 p.
- Anses (2018), [Évaluation des risques induits par le changement climatique sur la santé des travailleurs](#), Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, janvier, 240 p.
- CGDD (2022), [Comment évaluer les dommages psychologiques évités par la prévention des inondations ?](#), coll. « Théma Essentiel – Santé », mars, 4 p.
- COACCH (2021), « [The Economic Cost of Climate Change in Europe: Synthesis Report on COACCH Sector Results](#) », Policy Brief, juillet, 20 p.
- Garcia-León D., Casanueva A., Standardi G., Burgstall A., Flouris A. D. et Nybo L. (2021), « [Current and projected regional economic impacts of heatwaves in Europe](#) », *Nature Communications*, n° 12, octobre.
- Gasparrini A., Guo Y., Sera F. et al. (2017), « [Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios](#) », *The Lancet Planetary Health*, vol. 1(9), décembre, p. e360-e367.
- Giec (2022), [Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability](#), sixième rapport d'évaluation du Giec, contribution du groupe II, février (chapitre 13).
- Météo-France (2020), [Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole](#), rapport, 97 p.
- Onerc (2022), [La Prospective au service de l'adaptation au changement climatique](#), rapport au Premier ministre et au Parlement, Paris, La Documentation française, 385 p.
- Ready R., Navrud S., Day B. et al. (2004), « [Benefit transfer in Europe: How reliable are transfers between countries?](#) », *Environmental and Resource Economics*, n° 29, p. 67-82.
- Romanello M., McGushin A., Di Napoli C. et al. (2021), « [The 2021 report of the Lancet Countdown on health and climate change: Code red for a healthy future](#) », *The Lancet*, vol. 398(10311), octobre, p. 1619-1662.
- Sénat (2019), [Adapter la France aux dérèglements climatiques à l'horizon 2050. Urgence déclarée](#), rapport d'information de MM. Ronan Dantec et Jean-Yves Roux, fait au nom de la délégation sénatoriale à la prospective, mai, 190 p.
- Szewczyk W., Mongelli I. et Ciscar J.-C. (2021), « [Heat stress, labour productivity and adaptation in Europe: A regional and occupational analysis](#) », *Environmental Research Letters*, vol. 16(10).
- WWF (2021), [Dérèglement climatique. Le monde du sport à +2 °C et +4 °C](#), rapport, juillet, 63 p.

RETROUVEZ
LES DERNIÈRES ACTUALITÉS
DE FRANCE STRATÉGIE SUR :



www.strategie.gouv.fr



[@Strategie_gouv](https://twitter.com/Strategie_gouv)



[france-strategie](https://www.linkedin.com/company/france-strategie)



[FranceStrategie](https://www.facebook.com/FranceStrategie)



[@FranceStrategie_](https://www.instagram.com/FranceStrategie_)



[StrategieGouv](https://www.youtube.com/StrategieGouv)



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



FRANCE STRATÉGIE

Institution autonome placée auprès de la Première ministre, France Stratégie contribue à l'action publique par ses analyses et ses propositions. Elle anime le débat public et éclaire les choix collectifs sur les enjeux sociaux, économiques et environnementaux. Elle produit également des évaluations de politiques publiques à la demande du gouvernement. Les résultats de ses travaux s'adressent aux pouvoirs publics, à la société civile et aux citoyens.