RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

TRANSITION(S) 2050

CHOISIR MAINTENANT
AGIR POUR LE CLIMAT

Feuilleton

Adaptation au changement climatique : transports, agriculture, forêts, industries, bâtiments

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Retrouvez les scénarios ADEME en ligne sur www.transitions2050.ademe.fr

Crédits photo : Shutterstock

Conception éditoriale et graphique : bearideas

Rédaction : Robert Bellini

Brochure réf. 011799

ISBN : 979-10-297-1958-5

Dépôt légal : © ADEME Éditions, mars 2022

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

Rappel des conclusions des premiers travaux

Ce feuilleton s'inscrit dans le travail de prospective énergie ressources « **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » présenté le 30 novembre 2021 qui comprend les travaux initiaux et 14 feuilletons dont la publication s'étend de janvier à mai 2022. L'ensemble des documents publiés est disponible sur **www.transitions2050.ademe.fr**.

Pour rappel, « Transition(s) 2050 » est un travail prospectif qui dessine quatre chemins « types » cohérents et contrastés pour conduire la France vers la neutralité carbone tout en intégrant une large palette d'enjeux environnementaux, tels que les différents usages de la biomasse, l'eau d'irrigation, la qualité de l'air, la gestion des déchets, la quantité de matériaux pour la rénovation ou construction, souvent peu représentés dans les travaux prospectifs. Ces scénarios ont pour ambition d'éclairer les débats pour accélérer les prises de décisions, en particulier celles sur la prochaine Stratégie française énergie-climat.

Les quatre scénarios aboutissent tous à la neutralité carbone mais avec des voies différentes. Avant tout, ils ont pour objectif de faire prendre conscience à tout un chacun, quel que soit son niveau de responsabilité et d'implication dans la construction de ce cheminement, de la nature des transformations et des choix à faire.

Ils sont le résultat de plus de 2 ans de travaux mobilisant plus d'une centaine d'experts de l'ADEME ainsi que des partenaires extérieurs de différents milieux professionnels et académiques, mais également un comité scientifique, constitué de membres du conseil scientifique de l'Agence et complété de personnalités qualifiées.

Pour chaque scénario, l'ADEME a construit un récit cohérent, décliné dans chaque secteur technique, économique et social, au travers de variables structurantes. La description des scénarios couvre les secteurs du bâtiment, de la mobilité des voyageurs et du transport de marchandises, de l'alimentation, de l'agriculture, des forêts, de l'industrie, des déchets et des services énergétiques (fossiles, biocarburants, gaz, hydrogène, chaleur/froid et électricité). Les quatre scénarios et les mots clefs qui les caractérisent sont les suivants :

S1 GÉNÉRATION FRUGALE

- Frugalité contrainte
- Villes moyennes et zones rurales
- *Low-tech*
- Rénovation massive
- Nouveaux indicateurs de prospérité
- Localisme
- Moins de viande

S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES

- Modes de vie soutenables
- Économie du partage
- Gouvernance ouverte
- Mobilité maîtrisée
- Fiscalité environnementale
- Coopérations entre territoires
- Réindustrialisation ciblée

S3 TECHNOLOGIES VERTES

- Technologies de décarbonation
- Biomasse exploitée
- Hydrogène
- Consumérisme vert
- Régulation minimale
- Métropoles
- Déconstruction/ reconstruction

S4 PARI RÉPARATEUR

- Consommation de masse
- Étalement urbain
- Technologies incertaines
- Économie mondialisée
- Intelligence artificielle
- Captage du CO_2 dans l'air
- Agriculture intensive

Par ailleurs, au-delà de neuf enseignements clés, **ce travail a fait émerger cinq problématiques à mettre en débat** :

- La sobriété : jusqu'où ?
- Peut-on s'appuyer uniquement sur les puits naturels de carbone pour atteindre la neutralité ?
- Qu'est-ce qu'un régime alimentaire durable ?
- Artificialisation, précarité, rénovation : une autre économie du bâtiment est-elle possible ?
- Vers un nouveau modèle industriel : la sobriété est-elle dommageable pour l'industrie française ?

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Feuilleton Adaptation au changement climatique
des scénarios de Transition(s) 2050

Ce feuilleton complète le rapport « Transition(s) 2050 », dans lequel les quatre scénarios de neutralité carbone déploient des stratégies d'adaptation au changement climatique guidées par une organisation sociale et un rapport à la nature caractéristiques de chaque scénario. Ce feuilleton se focalise sur cinq secteurs économiques importants de la décarbonation : agriculture, forêt, industrie, bâtiment et cadre bâti et transports. Le système électrique fera l'objet d'un feuilleton ultérieur.

AGRICULTURE

L'agriculture est l'un des principaux secteurs affectés par le changement climatique. La robustesse climatique des trajectoires de transition a été évaluée à travers 6 catégories de facteurs de résilience, qui couvrent les systèmes agricoles et l'élevage. Les scénarios S1 et S2 améliorent l'ensemble des facteurs de résilience climatique. La gestion systémique des sols et des systèmes culturaux permet de maîtriser les consommations d'eau et de diminuer la dépendance à cette ressource. Les scénarios S3 et S4 développent des capacités techniques et financières d'adaptation mais accentuent les tensions sur l'eau. Ils supposent un développement de nouvelles ressources en eau, notamment non conventionnelles, dont les effets systémiques ne sont pas encore caractérisés. Dans la limite des connaissances actuelles, la cohérence de S3 et surtout de S4 ne semble pas robuste en climat changeant.

FORÊTS

Il semble aujourd'hui impossible de statuer sur la robustesse des quatre scénarios de gestion forestière face au changement climatique. Des connaissances complémentaires sont nécessaires, en particulier issues des diagnostics de vulnérabilité à l'échelle des peuplements. Cependant la prise en compte des conséquences des crises climatiques (en particulier les feux de forêt, ravageurs et tempêtes) dans les modèles conduirait certainement à revoir à la baisse le puits carbone en 2050. Les scénarios S1 et S2 présentent des « marges » de puits pour atteindre la neutralité carbone, ce qui n'est pas le cas pour S3 et S4 qui semblent donc moins robustes au changement climatique dans une optique de neutralité carbone.

INDUSTRIE

Les transitions industrielles sollicitent trois grands leviers : l'organisation industrielle et économique ; la coordination territoriale ; les technologies de décarbonation, qui peuvent être impactés par le changement climatique (par exemple : indisponibilité de ressources en eau ou biomasse, ruptures de chaînes logistiques, aléas climatiques sur les sites industriels, etc.).

Dans S1, d'après les premières analyses, le changement climatique ne remet pas en question ces trois leviers majeurs de la transition : les risques sont quantitativement plus limités comparativement aux autres scénarios et S1 est intrinsèquement favorable à l'émergence de capacités d'adaptation. Les scénarios S2 et S3 sont globalement plus diversifiés. Malgré le besoin de compléments pour mieux évaluer les risques au niveau territorial et mieux caractériser les capacités d'adaptation, notamment dans S2 en ce qui concerne la consommation d'eau pour la production d'hydrogène, ces scénarios ne sont pas remis en cause par le changement climatique. C'est dans S4 que les risques sont les plus importants sur l'organisation industrielle et économique et restent potentiellement forts sur les technologies de décarbonation.

BÂTIMENT ET CADRE BÂTI

L'exposition du parc bâti aux risques d'origine climatique est analysée en ce qui concerne les vagues de chaleur, les sécheresses et retraits-gonflements des argiles, les inondations et les submersions marines. Le corpus de données déjà disponibles permet de réaliser une modélisation quantitative de ces aléas. On constate que l'exposition augmente fortement d'ici 2050 (on peut parler de bascule de risques) pour les vagues de chaleur, les retraits-gonflements des argiles et les risques de submersion. L'évolution du risque inondation n'a pas pu être analysée dans cette étude par manque d'indicateur intégré.

Un large panel de solutions d'adaptation existe, qui permet à chaque scénario de proposer des stratégies d'adaptation aux quatre grands risques climatiques cités en fonction du degré de sensibilité du cadre bâti. Les scénarios S1 et S2 se distinguent en particulier par : 1) une mobilisation de solutions fondées sur la nature (renaturation, végétalisation) avec lesquelles la séquestration carbone permet de compenser les gaz à effet de serre émis lors de la mise en place des grandes actions d'adaptation, et 2) une sobriété des usages qui conduit à une réduction de la consommation énergétique de la climatisation à 6 TWh/an en 2050 (contre 20 TWh/an en 2020) grâce à une utilisation réservée aux périodes les plus chaudes. S3 et S4 s'appuient sur des solutions plus techniques et une faible sobriété dans les usages. La consommation électrique de la climatisation y est de l'ordre de 25 TWh/an en 2050 ; les autres actions d'adaptation (par exemple les digues ou bâtiments sur pilotis) sont émettrices nettes de gaz à effet de serre. L'analyse comparative des scénarios montre donc que les actions globales sur le cadre bâti et les solutions fondées sur la nature ont un réel potentiel d'économie d'énergie pour le confort d'été.

TRANSPORTS

Les systèmes de transport de voyageurs et de marchandises sont surtout vulnérables aux extrêmes climatiques, en particulier les vagues de chaleur, les inondations et précipitations extrêmes et les mouvements de terrain qui peuvent en résulter, ainsi que les tempêtes et cyclones. La variabilité temporelle des impacts est une notion importante : la dégradation des services ou l'interruption du trafic peuvent être très ponctuels (par exemple : suspension du trafic lors de précipitations intenses) ou durer des semaines voire des mois (par exemple en cas de glissements de terrain…).

Les évolutions climatiques peuvent potentiellement dégrader les trajectoires de décarbonation, essentiellement par risque de moindre disponibilité de biocarburants si les rendements des cultures et la disponibilité en eau s'avèrent plus faibles que prévus.

En termes de stratégies d'adaptation, S1 s'appuie notamment sur les sobriétés d'usage et l'entraide. Les scénarios S2 et S3 planifient davantage l'adaptation aux évolutions climatiques et notamment l'adaptation des infrastructures lors de leur construction ou renouvellement. Le scénario S4 s'attache davantage à la gestion de crises et aux réparations des dommages.

SYNTHÈSE PAR SCÉNARIO

S1 apparaît particulièrement facilitateur de l'adaptation au changement climatique. La sobriété est clairement un levier qui diminue l'exposition aux risques (agriculture, industrie, bâtiment et cadre bâti, transports). Ce scénario laisse aussi une place importante aux dynamiques naturelles (forêts) et à l'auto-organisation, qui permettent d'absorber plus facilement certains impacts climatiques. En contrepartie, ce scénario peut conduire à des baisses de rendement (agriculture, industries), intégrées dans les modèles économiques.

À l'inverse, S4 poursuit une logique de flux tendus (industries, transports) avec une consommation intensive de ressources (en particulier l'eau pour les usages agricoles) et un urbanisme très exposé (bâtiment et cadre bâti). Les réponses aux risques climatiques sont souvent sur la base de technologies encore à tester voire à imaginer. Néanmoins S4 ne semble pas tenable face aux impacts du changement climatique de 2050 sans une augmentation des inégalités (accès à la ressource en eau, assurances, technologies de gestion du risque) et une dégradation accélérée de la santé des écosystèmes (accroissement des pressions et impacts environnementaux).

Les scénarios S2 et S3 s'appuient davantage sur des techniques maîtrisées, des coopérations (surtout S2) et des partenariats qui mutualisent les efforts d'adaptation des acteurs publics et privés. Des besoins en connaissances complémentaires sont nécessaires pour s'assurer de la robustesse des trajectoires de décarbonation face au changement climatique, notamment sur la chaîne hydrogène pour S2 et la ressource en eau pour S3.

3 POINTS-CLÉS

#1 L'eau est l'enjeu de l'économie du XXIe siècle

Les ressources en eau sont essentielles pour la majorité des secteurs étudiés dans ce feuilleton : agriculture, forêts, industrie et hydrogène, bâtiment et cadre bâti, et indirectement les transports. En 2050, la quantité et la qualité de l'eau seront potentiellement des contraintes de premier ordre pour ces secteurs. S1 et S2 agissent en premier lieu sur la maîtrise de la demande : au prix d'un grand effort collectif construit sur la durée, ils seront moins impactants pour la ressource et moins impactés par les tendances climatiques, ce sont donc des scénarios davantage résilients. S3 et S4 cherchent surtout à développer l'offre. S4 va dans le sens d'une libéralisation du marché de l'eau (*cf.* rapport « Transition(s) 2050 »), avec une possibilité de marché à terme de l'eau : les conséquences économiques, environnementales et sociales sont encore difficilement appréhendables dans leur globalité et potentiellement risquées.

#2 Les différents échelons des politiques publiques aideront à planifier l'adaptation de l'économie

Différents échelons sont mobilisés pour identifier les risques et coordonner l'adaptation des acteurs territoriaux : depuis l'échelon local (en particulier dans S1) au plus proche des citoyens et des PME, les Régions (notamment dans S2), le niveau national et l'État stratège (S4), jusqu'à la régulation par l'échelon européen (S3 en particulier pour Industries).

Dans tous les cas, l'échelon territorial intègre différents enjeux, évalue les options, est tiers de confiance des acteurs privés. La puissance publique est également indispensable pour orchestrer l'adaptation transformative voire le repli stratégique de filières fortement territoriales.

L'adaptation de l'économie demande donc une organisation des compétences et une disponibilité de l'ingénierie publique territoriale : ces ressources humaines sont une condition sine qua non d'une adaptation massive.

#3 On en sait déjà assez pour massifier les actions d'adaptation

Le secteur agricole et en particulier la viticulture et la filière « Bois » ont déjà lancé des expérimentations qui s'installent sur plusieurs années. À l'inverse, un certain nombre d'actions renforçant les capacités d'adaptation des organisations sont aussi à entreprendre dès maintenant : ce sont par exemple les solutions d'adaptation fondées sur la nature, la prise en compte des futurs climatiques dans nos politiques publiques notamment la rénovation thermique, l'information et la montée en compétence de tous les acteurs ou les diagnostics de risques climatiques. Ces actions répondent également à un besoin grandissant d'inclusion sur le périmètre national, ou de solidarité et de responsabilité à l'échelle internationale.

L'adaptation doit donc être expérimentée et massifiée dès maintenant, même si de nombreuses connaissances nouvelles sont attendues pour renseigner les décisions et trajectoires des prochaines années.

Liste des experts sollicités au cours de la prospective « Adaptation au changement climatique »

ADEME : Loïc Antoine ; Stéphane Barbusse ; Robert Bellini ; Jean-Louis Bergey ; Aurélien Bigo ; Aude Bodiguel ; François Boisleux ; Cyrielle Borde ; Miriam Buitrago ; Albane Gaspard ; Stephia Latino ; Quentin Minier ; Antoine Piérart ; Audrey Trévisiol.

SOMMAIRE

Rappel des conclusions des premiers travaux
3

Résumé exécutif
4

1. Adapter l'économie au changement climatique
8

2. Agriculture et forêt
12

3. Industrie
19

4. Bâtiment et cadre bâti
26

5. Transports
33

6. Références bibliographiques
38

1. Adapter l'économie au changement climatique

Ce feuilleton s'inscrit dans la continuité du chapitre *1.3. Adaptation au changement climatique* du rapport « Transition(s) 2050 ». Il propose des focus sur les capacités d'adaptation de quelques secteurs particulièrement sensibles au changement climatique, avec pour objectif de pointer les leviers et les freins de l'adaptation caractéristiques des quatre scénarios de Transition(s) 2050. L'adaptation au changement climatique du mix électrique fera l'objet d'un feuilleton ultérieur.

Comme dans Transition(s) 2050, le scénario climatique de référence est le RCP 4.5 ; néanmoins la sensibilité climatique a pu être appréciée en se projetant dans le scénario RCP 8.5 (forêt, bâtiment et cadre bâti).

1.1. De la gestion des risques à l'adaptation au changement climatique

Dans un climat globalement stable sur des échelles de temps de quelques générations tel que les sociétés l'ont connu jusqu'à présent, l'historique des risques naturels renseigne sur leur probabilité et leur dangerosité : il est alors possible de se donner les moyens techniques de prévenir et gérer les conséquences des risques naturels, ou les moyens assurantiels pour en couvrir les pertes financières.

Dans un climat changeant drastiquement sur quelques décennies, comme actuellement [A1], la chronique du passé ne suffit plus. La démarche d'actualisation de la gestion des risques au fur et à mesure reste nécessaire, mais aura toujours un train de retard. Et surtout, cette démarche pourra rester aveugle à certains extrêmes (les faibles probabilités aux conséquences importantes, par exemple la tempête Alex en 2020 dans la vallée de la Roya), aux effets en cascade et aux impacts systémiques. La démarche d'adaptation intervient alors pour compléter la gestion des risques [B1] :

1. en se projetant à court, moyen et long terme pour anticiper les conséquences du changement climatique sur l'ensemble des territoires et des activités, en termes de pression, de risques mais aussi d'opportunités ;

2. en planifiant collectivement des actions qui renforcent les capacités du système à s'adapter et en échelonnant ces actions dans le temps ;

3. et surtout en suivant et en évaluant les effets des actions en fonction des évolutions climatiques et socio-économiques, pour être capable de réagir de manière flexible et dynamique.

Le cadrage général des stratégies d'adaptation au changement climatique [C1] et les retours d'expérience d'entreprises à l'international [B2] retiennent 4 grandes classes de capacités d'adaptation *(Tableau 1)*.

Tableau 1 Capacités d'adaptation : 4 grandes catégories

Ressources techniques et technologiques	Capacités d'organisation	Ressources financières	Ressources humaines
C'est en général le premier réflexe : le changement climatique est analysé d'un point de vue technique, les acteurs recherchent souvent des solutions technologiques.	Pour agir sur le long terme, les solutions techniques doivent être adossées à une organisation adéquate : instances de gouvernance internes et externes aux entreprises, gestion flexible.	L'adaptation se finance à court, moyen et long terme par réallocations de ressources existantes (pour maintenance ou évolution) ou financement complémentaire.	Depuis la mobilisation à l'information et à la formation, les ressources humaines sont le moteur de la conduite du changement en environnement incertain et complexe, la dimension psychosociologique[1] prend une importance capitale.

1 La psychosociologie s'intéresse aux motivations et aux actions des individus par rapport au corps social. C'est pourquoi, dans la société individualiste et individualisée qui est la nôtre, la psychosociologie joue un rôle important de la conduite du changement et donc de l'adaptation au changement climatique.

1.2. L'adaptation au changement climatique du secteur public

Le secteur public est bien évidemment concerné par les conséquences du changement climatique, que ce soit sous l'angle des infrastructures, des conditions de travail, ou de l'évolution des activités. Nous ne le traitons pas dans ce feuilleton, mais abordons quelques-uns des enjeux à travers deux exemples.

EXEMPLE 1 : CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SECTEUR DE LA SANTÉ

- Adapter les infrastructures et les conditions de travail : la quasi-totalité des 3 000 établissements de santé (publics et privés) est exposée et sensible au changement climatique. Sur deux aléas majeurs que sont les inondations et les vagues de chaleur : la majorité des établissements serait soumise à un risque inondation [B3] ; tous les établissements seront exposés aux vagues de chaleur avec une sensibilité particulière dans les établissements pour les personnes âgées [A2] ;

- anticiper les conséquences du changement climatique sur l'activité : le changement climatique aura des impacts sur la santé en métropole et outre-mer [B4]. Ces conséquences sont d'abord liées aux vagues de chaleur, engendrant des effets plutôt saisonnalisés entre mai et septembre en métropole ou en saison humide en outre-mer (médecine générale, dermatologie ; multiplication des allergies). Les événements intenses et soudains (précipitations intenses et mouvements de terrain) sont aussi source d'accidentologie accrue et de traumatisme psychologique. Ces risques sont à compléter avec l'évolution des modes de vie et le vieillissement de la population. Ils invitent à inscrire les prospectives santé dans l'évolution du climat.

EXEMPLE 2 : CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SÉCURITÉ CIVILE

- Adapter les infrastructures et les conditions de travail : les spécificités de la sécurité civile concernent la continuité des services et réseaux prioritaires : assainissement, eau, électricité, gaz, télécommunications. Le code de la sécurité intérieure fixe des exigences de résilience, qui s'appliquent aux événements climatiques extrêmes (en particulier les pics de chaleur, les pluies extrêmes ou les submersions marines) ;

- anticiper les conséquences du changement climatique sur l'activité : le changement climatique induit des interventions de sécurité civile plus intenses (par exemple des feux de forêt plus étendus, plus fréquents) et une extension des aires géographiques d'intervention. Des évolutions des modalités de coopération entre sécurité civile et armées sont également envisagées [B5], que ce soit à l'intérieur du territoire national ou à l'extérieur, à condition de ne pas saturer les capacités d'intervention des différents corps en démultipliant leurs missions.

Ces exemples montrent que les impacts climatiques sur le secteur public pourront avoir des effets en cascade à large échelle. Ils invitent à poursuivre les exercices de prospective du secteur public, en particulier pour travailler en amont avec les citoyens les options d'adaptation disponibles et leurs conditions de réalisation [A3] [A4].

1.3. Qui paiera pour les coûts échoués et l'adaptation au changement climatique des biens communs ?

Les coûts échoués sont les investissements déjà payés mais qui, avant la fin de leur durée d'amortissement, ne sont plus en mesure d'apporter un retour économique, ici en l'occurrence à la suite des impacts physiques du changement climatique sur l'actif en question. Les milieux déjà particulièrement impactés par le changement climatique, montagne et littoral, sont illustratifs de ce problème : certaines stations de ski, ou le cas de l'immeuble Signal[2] en Gironde, montrent que ce partage des coûts échoués et les difficultés juridiques qui s'ensuivent posent déjà de grands problèmes financiers, sociaux et économiques[3].

De plus, le changement climatique est l'un des premiers facteurs d'érosion de la biodiversité et des écosystèmes [C2]. Cela conduit à une dégradation des services rendus par la nature. Ces externalités ne sont pas prises en compte actuellement. La restauration et la préservation des services rendus par la nature, autrement dit l'adaptation des biens communs, est donc à quelques exceptions près à la charge de la puissance publique. Différents mécanismes pourraient permettre de prendre en compte cette nécessaire adaptation par les parties prenantes *(section 2.2.2)*.

2 Nom de l'immeuble résidentiel situé à Soulac en Gironde, menacé d'effondrement par l'érosion côtière et évacué par les 75 propriétaires en 2014.

3 M.-L. Lambert *et al.*, *Justice climatique et démocratie environnementale – Les inégalités d'accès au droit des populations vulnérables aux risques littoraux – quelques éléments de comparaison*, Vertigo, 2019.

La finance et l'assurance sont déjà au premier rang de l'adaptation au changement climatique.

Les institutions financières et de régulation économique (notamment les banques centrales, les banques d'affaires et sociétés d'assurance et de réassurance) s'emparent également des mécanismes d'adaptation au changement climatique (« *No action on climate change is not an option* », du titre du rapport de Swiss Re de 2021 sur l'économie du changement climatique). En France, le secteur de la finance s'est surtout focalisé sur le risque de transition, lié aux trajectoires de décarbonation des acteurs. L'adaptation au changement climatique reste donc surtout un objet de recherche pour les superviseurs bancaires. Que ce soit à destination des acteurs territoriaux ou des filières économiques, les chapitres suivants démontrent le besoin de davantage d'opérationnalité [B6]. En revanche, sur le champ de l'assurance, l'évolution climatique de la sinistralité chez les assureurs privés ainsi que dans le régime Catastrophes Naturelles[4] est davantage documenté [B7] et rentre dans le domaine législatif[5].

D'un point de vue monétaire, les conséquences du changement climatique sur l'inflation sont encore peu étudiées. Les stratégies se limitant à la gestion des risques, au fur et à mesure du changement climatique, à la couverture assurantielle des dommages (en particulier sur la production agricole et sur les bâtiments) et à la réparation, seraient plutôt inflationnistes [C3] en reportant le coût des sinistres sur les consommateurs, en laissant courir des investissements échoués et sans reconnaître que le coût de l'inaction est supérieur au coût de l'adaptation. Réciproquement, les actions de préparation, notamment celles fondées sur la nature, contribuent plutôt à maîtriser l'inflation.

4 Régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, dit régime CatNat.
5 Voir notamment la loi Climat et Résilience, 2021.

1.4. Évolutions des conditions de travail

Le *Tableau 2* synthétise les grandes catégories d'impacts, selon l'état des connaissances actuelles [B8], ainsi que les actions envisagées pour s'adapter au climat de 2050 [B9].

Tableau 2 Deux grandes catégories d'impact sur les conditions de travail : 1) impacts sanitaires et physiologiques ; 2) impacts sur la mobilité domicile-travail et les déplacements professionnels

Impacts sur la santé et les conditions de travail		
Facteurs climatiques	**Impacts sur les travailleurs**	**Actions à engager pour y répondre**
Canicules	Coups de chaleur (fièvre, céphalées, fatigue, baisse de l'attention et de la vigilance, malaises), problèmes dermatologiques.	• Aménagement de zones ombragées, rafraîchissement des bâtiments, mise à disposition de sources d'eau potable. • Dispositifs de surveillance météorologique et d'alerte automatique en fonction de seuils (systèmes d'alertes précoces). • Sensibilisation, formation, prévention. • Adaptation des équipements individuels de protection et des tenues de travail. • Aménagement des horaires de travail.
Augmentation tendancielle des températures, entraînant un changement des écosystèmes	Allergies plus nombreuses, risques de nouvelles maladies parasitaires ou infectieuses, toxicité des polluants chimiques accrue avec la température, risque accru d'incendie ou d'explosion.	• Système précoce de détection des risques sanitaires • Sensibilisation et prévention.
Pluies extrêmes	Conditions de sécurité au travail.	• Analyse des risques (chantiers temporaires + installations permanentes) et aménagements.

Impacts sur les accès aux sites		
Facteurs climatiques	**Durée de l'impact**	**Actions à engager pour y répondre**
Précipitations extrêmes (pluies, grêles), feux de forêt	De courte durée (quelques heures à 1 jour).	• Surveillance et système d'alerte. • Flexibilité des horaires et temps de travail. • Télétravail.
Canicules, inondations, feux de forêt, cyclones	De durée moyenne (quelques jours).	• Flexibilité des temps de travail. • Télétravail. • Programmation saisonnière de la production, stockage.
Mouvements de terrain, inondations, vagues de chaleur prolongées	De longue durée (semaines-mois).	• Analyse cartographique des aléas « mouvements de terrain » ; aménagements, retraits stratégiques. • Télétravail. • Programmation saisonnière de la production.

1.5. S'adapter aux conséquences du changement climatique : un projet politique

Le rapport Transition(s) 2050 a montré que les stratégies d'adaptation au changement climatique posaient des questions systémiques : sur notre organisation sociale, sur la gestion des biens communs et sur notre rapport à la nature. Dans les systèmes complexes que sont les secteurs économiques, un processus robuste d'adaptation au changement climatique actionne plusieurs leviers complémentaires : l'auto-organisation ou l'agilité des organisations, le suivi et la régulation, les redondances fonctionnelles et l'appropriation par l'ensemble des parties prenantes. La puissance publique est au cœur de ce processus. L'adaptation au changement climatique constitue l'un des socles du pacte social du XXIe siècle [C4] : le développement économique et le changement climatique ont des trajectoires liées pour les nombreuses décennies à venir [C5]. Il est donc urgent que la société s'empare du sujet, retrouve un récit fédérateur et porte une parole positive de notre nécessaire adaptation.

2. Agriculture et forêt

2.1. Se projeter en 2050 : les conséquences du changement climatique

L'agriculture et la forêt sont deux des principaux secteurs affectés par le changement climatique :

- par les évolutions tendancielles sur l'ensemble du territoire : hausse des températures, augmentation de la concentration en CO_2, baisse de l'humidité moyenne des sols, augmentation des variabilités interannuelles du climat ;
- par des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresse, canicule, feux de forêt, impact des tempêtes en forêt, prolifération d'agents pathogènes, ravageurs et autres parasites…) dont la fréquence et l'intensité augmenteront durant les prochaines décennies ;
- par des effets en cascade ou des spécificités locales dues à la géographie : impacts climatiques sur la biodiversité (vertébrées et invertébrées, végétation ; déplacement des espèces), érosion des sols.

Ces impacts du changement climatique affectent la quantité et la qualité des productions (pour l'agriculture : rendements des cultures et productivité des animaux), la productivité et la santé des peuplements forestiers, les aires potentielles de répartition des essences, le bien-être des animaux, les capacités de stockage de carbone, ou encore le prix de vente des denrées sur les marchés internationaux et les risques financiers. De plus, la variabilité interannuelle des rendements agricoles est accrue.

Pour l'agriculture : capitalisant sur le projet Climator[6] [C6], les systèmes agricoles futurs y sont imaginés à partir des systèmes représentatifs actuels (ce sont les « fermes types ») projetés à l'horizon 2050 ; les évolutions du secteur agricole sont alors simulées[7] par l'intégration de pratiques agronomiques et d'évolutions techniques clairement identifiées et documentées dans la littérature scientifique et technique. Les conséquences du changement climatique avec les hypothèses du scénario RCP 6.0 du GIEC sont traduites par des hypothèses sur les rendements.

Pour la forêt : capitalisant les résultats de l'étude INRAE-IGN [C7] le scénario RCP 8.5 a été utilisé pour une hypothèse de « climat aggravé ». Cette hypothèse qu'on pourrait juger pessimiste permet de limiter un biais du modèle tendant à surestimer la productivité des forêts. L'étude INRAE-IGN utilise le modèle biophysique GO+ [C7] couplé à un modèle empirique des dynamiques forestières afin de tenir compte d'effets climatiques sur la production et la mortalité naturelle en climat changeant. Un effet de surmortalité des arbres adultes liée aux sécheresses futures est également modélisé.

Au-delà de ces hypothèses, dans les scénarios Transition(s) 2050, la ressource en eau et sa disponibilité future ont bien été identifiées comme des paramètres clés de la résilience des systèmes de production. Néanmoins, l'approche nationale n'a pas permis d'intégrer directement cette question de la disponibilité en eau[8]. De plus les impacts des crises climatiques (ex : tempêtes, incendies ou ravageurs en forêt) ne sont actuellement pas suffisamment évalués : ces impacts en climat et systèmes agricoles ou sylvicoles changeants sont très complexes à modéliser car ils doivent inclure de nombreux effets cascades et rétroactions. Ils ne sont donc pas quantifiés dans les scénarios Transition(s) 2050. L'historique des événements climatiques extrêmes peut néanmoins nous renseigner sur l'importance des niveaux d'impacts qui peuvent être attendus dans les prochaines décennies, par exemple :

- conséquences des canicules : les canicules de 1976 et de 2003 ont réduit la production agricole nationale de l'ordre de 25 %[9] ;
- conséquences des tempêtes : la tempête Klaus en 2009 a occasionné des dégâts importants en forêt, estimés à 43 millions de m³ d'arbres déracinés ou courbés[10], soit 14 % du volume sur pied de la zone impactée ;

6 Projet mené de 2007 à 2010 sur l'impact du changement climatique sur des productions végétales en France, avec des déclinaisons par grandes zones géographiques.
7 Grâce au modèle MoSUT mis en œuvre par SOLAGRO dans le cadre du projet SISAE.
8 Voir la *section 2.3* sur les besoins de connaissance complémentaires.

- conséquences des ravageurs : la crise des scolytes sur les épicéas entre 2018 et 2021 a ravagé 30 000 ha de bois, soit 10 millions de m^3 ou encore 17 % du volume sur pied de la zone concernée (Grand-Est et Bourgogne-Franche-Comté[10]).

Cette limite des modèles est importante pour les projections du puits forestier à 2050 et conduit à un risque marqué de surestimation du puits forestier dans l'ensemble des scénarios. Dans la suite de ce chapitre, les impacts des événements extrêmes sont traités qualitativement.

Le *Tableau 3* reprend les différentes catégories d'impact du changement climatique et analyse les principales conséquences pour l'agriculture [C6] [C8] et les forêts [C9].

Tableau 3 *Impacts à moyen terme du changement climatique pour l'agriculture et les forêts*

Impacts climatiques	Conséquences pour l'agriculture et la forêt en 2050
Conséquences de l'évolution tendancielle des températures moyennes (air, eau)	• Précocité de débourrement et floraison, d'où un impact croissant des gels de mars-avril pouvant toucher l'ensemble du territoire métropolitain. Raccourcissement de certains cycles de végétation (par ex. : canne à sucre) en outre-mer. • Déplacement des populations de vertébrés et invertébrés dont les ravageurs ou les vecteurs de maladies cryptogamiques mais aussi des auxiliaires. • Feux de champ et feux de forêts étendus à tout le territoire, aggravés en période de canicule et de sécheresse.
Canicule	• Enjeux sanitaires pour les animaux d'élevage. • Coups de chaud et pertes de rendement ou de qualité des cultures. • Le risque de canicule est présent sur l'ensemble du territoire.
Manque d'eau, sécheresse	• Stress hydrique, perte de production et fragilisation des plantes. • C'est le facteur le plus impactant pour les cultures permanentes et les prairies, dépendant fortement du type de sol et de sa capacité de rétention en eau.
Variabilité du climat	• Stress des espèces végétales, moindres rendements. La variabilité accrue des récoltes, d'une année sur l'autre, accentue les risques économiques.
Tempêtes et cyclones	• Augmentation probable de l'intensité des cyclones les plus puissants, impactant en outre-mer sur les cultures maraichères notamment bananes et cannes. • En France métropolitaine, même si les évolutions de l'intensité des tempêtes sont incertaines, les risques inondation et submersion induites par les tempêtes sont accentués. Les tempêtes hivernales peuvent engendrer des coupes totales et ponctuelles de forêts.
Inondations, pluies extrêmes	• Pluies intenses, inondations. Impact régulier des grêles, entraînant des pertes très variables (de 5 % à 100 % d'une exploitation).
Érosion et mouvements de terrain	• La variabilité du climat et les événements intenses plus fréquents contribuent à l'érosion des sols. Le dégel du permafrost en haute montagne menace la stabilité des sols et des infrastructures.
Élévation du niveau de la mer	• Submersion marine, érosion du littoral : près de 1 000 communes concernées par les submersions marines, qui entraînent une salinisation des terres et des intrusions salines dans les aquifères côtiers.

Sources : [C6] [C8] [C9].

9 Afterres 2050, Solagro.
10 https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/tempete_klaus.pdf.
11 https://agriculture.gouv.fr/crise-scolytes-sur-epiceas-bilan-fin-2020-10-millions-de-m3-et-30-000-ha-de-bois-scolytes-depuis#:~:text=L'%C3%A9pid%C3%A9mie%20de%20scolytes%20initi%C3%A9e.

2.2. Capacités des systèmes agricoles et forestiers à s'adapter au changement climatique dans les quatre scénarios de Transition(s) 2050

Si la production agricole est impactée, c'est bien évidemment les filières agroalimentaires dans leur ensemble, de l'amont à l'aval, qui sont concernées [C10]. En effet, au-delà de la production, le changement climatique aura des conséquences en termes d'approvisionnement en matières premières (type, volumes et origine/importations-exportations, etc.), de transformation (modification des processus de la filière de transformation) mais également en termes de stockage, de transport logistique ou de modes de consommation (saisonnalité, préférences des consommateurs pour certains produits, etc.), ou encore en termes de volatilité des prix des denrées agricoles (spéculation, etc.).

De même en forêt, le changement climatique aura des conséquences globales sur les nombreux services écosystémiques fournis : réservoir de biodiversité inestimable, les forêts contribuent à la conservation des sols et de la qualité des eaux et de l'air, au captage et au stockage du carbone, aux valeurs et services socio-culturels et fournissent du bois pour les matériaux et l'énergie.

Ainsi, dans les quatre scénarios de Transition(s) 2050, les filières agroalimentaires et filières « Bois » évoluent en cohérence avec l'ensemble des hypothèses sur les modes de vie ou sur les besoins de ressources végétales dans les autres secteurs. Dans ce feuilleton, nous nous focalisons sur le premier maillon de ces chaînes : les productions agricoles et forestières.

2.2.1. Grille d'analyse des capacités d'adaptation

Nous avons réparti les pratiques et les capacités d'adaptation [C8] qui en résultent en 6 catégories : elles permettent de rebondir après des crises climatiques et d'adapter les systèmes agricoles et sylvicoles aux évolutions de long terme.

Gestion des sols – protection de la biodiversité

Exemples :
- agriculture : pratiques agroécologiques, couverture et fertilité des sols, éléments arborés dans les agrosystèmes (développement des haies et agroforesterie).
- gestion forestière : éviter le labour en plein, prendre des mesures contre le tassement, maintenir le bois mort et les rémanents des coupes, préserver des trames de vieux bois et îlots de vieillissement, protéger les zones humides et les cours d'eau.

Choix des espèces, des variétés et des systèmes de gestion

Exemples :
- agriculture : diversification des assolements et des ressources fourragères, recours aux légumineuses, évolution de la sélection variétale vers davantage de résilience des cultures, utilisation de semences paysannes et locales adaptées à chaque terroir.
- gestion forestière : diversité des essences, peuplements mélangés, régénération naturelle, diversité des âges et des tailles sur la parcelle ; protection de la diversité génétique ; essences adaptées aux conditions de station, limitation des surfaces des coupes mettant les sols à nu, régulation de la densité des peuplements.

Maîtrise de la consommation d'eau

Exemples :
- technique d'évaluation des besoins en eau, techniques d'irrigation pour optimiser la consommation, choix des variétés et des espèces cultivées, etc.

Gestion des maladies et des ravageurs

Exemples :
- agriculture : rotations des cultures, infrastructures agroécologiques, faible densité des animaux en bâtiment.
- gestion forestière : essences adaptées aux conditions de station, régulation de la densité des peuplements, peuplements mélangés.

Diversification des revenus et protection économique

Exemples :
- diversification des productions agricoles, valorisation du bois énergie, du bois d'œuvre ou de la production fruitière grâce à l'agroforesterie ; diversification des essences et des modes de gestion en forêt.

Confort des animaux notamment en période de canicule

2.2.2. Capacités d'adaptation et risques dans les quatre scénarios : agriculture

Les résultats des modélisations présentées dans le rapport Transition(s) 2050 conduisent à quatre scénarios relativement contrastés en ce qui concerne les 6 catégories de capacités d'adaptation présentées en *section 2.2.1*.

COHÉRENCE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Avec des systèmes culturaux plus diversifiés, aux rendements moins optimisés, le scénario 1 **améliore l'ensemble des facteurs de résilience climatique détaillés en** *section 2.2.1*. Ce scénario dégage un solde excédentaire de production fourragère qui permet de garder de la marge face aux impacts climatiques.

Des opportunités apparaissent dans l'arboriculture avec de nouvelles productions (par exemple amandes, agrumes). En élevage, les systèmes extensifs favorisent le confort des animaux.

S1 est intrinsèquement favorable à une gouvernance agricole, alimentaire et foncière cohérente à l'échelle de chaque territoire et, au niveau national, à la création d'un ministère commun Agriculture et Environnement.

MESURES D'ADAPTATION COMPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES, ENCORE À ÉVALUER

Les équilibres économiques pour les exploitants doivent accommoder une baisse des rendements, une mise en avant du travail humain, une moindre consommation d'intrants et la valorisation de services écosystémiques.

COHÉRENCE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

En misant sur la diversification et un retour important des haies et de l'agroforesterie, en recourant à davantage de technique que dans le scénario 1 (choix variétaux, irrigation de précision), le scénario 2 **améliore l'ensemble des facteurs de résilience climatique.**

S2 est intrinsèquement favorable à une gouvernance agricole, alimentaire et foncière interrégionale et, au niveau national, à la création d'un ministère commun Agriculture et Environnement. Il facilite l'adaptation des biens communs (ressources en eau, réseaux hydrographiques, biodiversité ou paysages) en éco-conditionnant les aides publiques, en développant les paiements pour services écosystémiques y compris pour l'adaptation, ou en mettant en place des bonus/malus sur les pratiques agricoles et l'utilisation d'intrants.

MESURES D'ADAPTATION COMPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES, ENCORE À ÉVALUER

Différentes innovations organisationnelles sont attendues pour s'adapter plus finement aux spécificités territoriales (par exemple : bassins de production agricole transfrontaliers).

S3 TECHNOLOGIES VERTES

COHÉRENCE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Ce scénario développe une partie des capacités techniques et financières pour l'adaptation au changement climatique. Cependant, il tend à **accentuer les tensions sur la ressource en eau**, ce qui pèse en défaveur de sa résilience climatique.

S3 facilite l'adaptation des biens communs (ressources en eau, réseaux hydrographiques, biodiversité ou paysages) en éco-conditionnant les aides publiques, en développant les paiements pour services écosystémiques y compris pour l'adaptation, ou en mettant en place des bonus/malus sur les pratiques agricoles et l'utilisation d'intrants.

MESURES D'ADAPTATION COMPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES, ENCORE À ÉVALUER

Face au risque sur la ressource en eau, des mesures complémentaires sont à mettre en place. Elles ne sont actuellement pas suffisamment documentées et nécessiteront des itérations ultérieures pour les intégrer dans les scénarios prospectifs. Ce sont notamment :

- des nouvelles techniques d'irrigation ;
- une utilisation des eaux non conventionnelles[12].

S4 PARI RÉPARATEUR

COHÉRENCE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Même si ce scénario actionne plusieurs capacités d'adaptation, **il accentue des tensions déjà présentes ou des risques d'effet en cascade**.

La principale difficulté concerne la ressource en eau, puisque ce scénario présente la plus forte consommation d'eau d'irrigation. Pour relâcher cette contrainte, ce scénario vise à développer l'offre de ressource (avec notamment des retenues d'eau) davantage que maîtriser la demande.

Face aux risques de crises biotiques et abiotiques, le scénario développe le biocontrôle, les solutions innovantes, dont les techniques génétiques, pour la protection des cultures. Toutefois la consommation toujours importante de produits phytosanitaires bloque le sol dans un cycle de dépendance aux intrants. Pour inciter à utiliser moins d'intrants, des bonus/malus peuvent être mis en place.

Par ailleurs, les paiements pour services écosystémiques, y compris l'adaptation des biens communs, permettent de mobiliser des financements privés.

En faisant le pari de nouvelles techniques et technologies encore peu évaluées, en réduisant les capacités d'auto-régulation des écosystèmes et en maintenant les relations de dépendance technique, ce scénario paraît le moins résilient face au changement climatique.

MESURES D'ADAPTATION COMPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES, ENCORE À ÉVALUER

Les mesures complémentaires ne sont actuellement pas suffisamment documentées et nécessiteront des itérations ultérieures pour les intégrer dans les scénarios prospectifs. Ce sont notamment :

- de nouvelles techniques d'irrigation ;
- l'utilisation des eaux non conventionnelles ;
- la mise en œuvre d'unités de désalinisation, qui posent des questions de consommation énergétique, d'impacts environnementaux sur les effluents et de surcoûts ;
- les techniques de biocontrôle : évaluation des impacts environnementaux ;
- le développement des OGM, qui font l'objet de débats sociétaux.

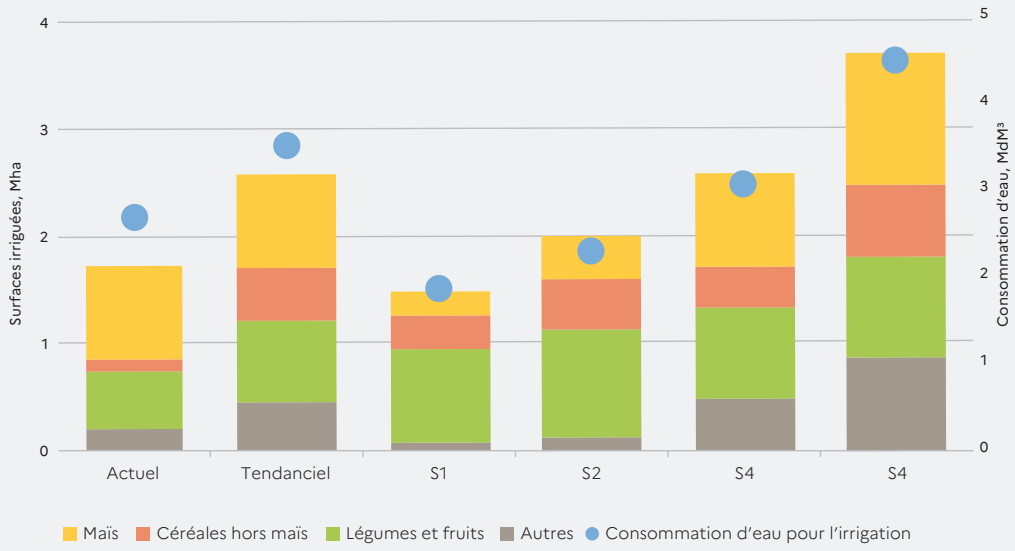
12 L'eau utilisée pour l'irrigation des cultures est habituellement prélevée en surface ou dans les nappes souterraines. Des alternatives non conventionnelles consisteraient, sous respect de normes particulières, à utiliser des ressources telles que les eaux usées en sortie de traitement, les eaux saumâtres dessalées, l'eau issue d'un processus industriel, etc.

2.2.3. Consommation en eau : un enjeu majeur

La section précédente pointe une divergence majeure entre les scénarios S1 et S2 d'un côté, et S3 et S4 de l'autre : S1 et S2 tendent vers une meilleure maîtrise de la consommation en eau en actionnant l'ensemble des facteurs de résilience climatique ; S3 et surtout S4 sont largement plus consommateurs en eau d'irrigation dans un contexte de tension sur la ressource, comme indiqué dans le ***Graphique 1***. Ces différences sont notamment en lien avec les surfaces de cultures irriguées comme le maïs, et en lien avec les objectifs de rendements dans les différents scénarios.

En abordant la question de façon systémique sur l'ensemble des composantes des systèmes culturaux, seul S1 aboutit à une réduction de la consommation d'eau par rapport à la situation actuelle ; S2 maintient la consommation à un niveau comparable à l'actuel. Les scénarios S3 et S4 sont dans une logique de compensation par de nouvelles ressources non conventionnelles.

Graphique 1 *Usages de l'eau actuels et à l'horizon 2050 dans les différents scénarios (consommation et surfaces irriguées)*



2.2.4. Capacités d'adaptation et risques dans les quatre scénarios : forêts

Les modèles forestiers à grande échelle utilisés dans Transition(s) 2050 ne nous permettent pas de différencier les résultats par type de gestion sylvicole (mis à part le taux de prélèvement de bois et pour S4, le plan de reboisement avec des essences productives), ni d'analyser la vulnérabilité des peuplements selon le type de peuplement, sa gestion ou sa zone géographique.

Par ailleurs, plusieurs capacités d'adaptation sont liées à la qualité des sols et à la biodiversité, dont la préservation favorise le bon fonctionnement des écosystèmes et donc leur résilience face aux impacts du changement climatique. Il est encore difficile d'évaluer finement les impacts des différents scénarios sur ces capacités d'adaptation ou encore sur la qualité de sols ou sur la biodiversité car cela nécessiterait des analyses plus approfondies sur les pratiques sylvicoles et leur mise en œuvre sur le terrain.

Au regard de ces éléments, il nous semble aujourd'hui impossible de statuer sur la résilience climatique des quatre scénarios de gestion forestière présentés dans Transition(s) 2050. Nous pouvons cependant remarquer que les orientations des scénarios (S3 et S4 plus orientés vers la production de bois par rapport à S1 et S2) dessinent deux principales stratégies d'adaptation :

- les scénarios 1 et 2 peuvent davantage s'appuyer sur des dynamiques naturelles : irrégularisation des peuplements, réduction des surfaces des coupes rases, régénération naturelle et peuplements mélangés, augmentation de la surface de forêt avec une figure de protection forte (surtout S1), protection de la diversité génétique existante et des mécanismes d'adaptation naturelles des arbres ;

- à l'inverse, les stratégies d'adaptation de S3 et S4, davantage orientées vers la production de bois, pourraient s'appuyer d'une part sur la réduction des volumes de bois sur pied (réduction de l'âge de coupe, augmentation de l'intensité des éclaircies, augmentation de la fréquence des coupes dans les forêts feuillues et en montagne) afin de réduire les risques de pertes par dépérissement ou événements extrêmes, et d'autre part sur un changement proactif des essences par plantation et introduction des nouvelles ressources génétiques. Ces prélèvements renforcés génèrent à leur tour des risques liés aux impacts des coupes mécanisées : tassement des sols, sortie accrue des rémanents, surfaces nues, travail du sol avant plantation. La référence [B10] traite de la limitation de ces risques.

Les diagnostics de vulnérabilité à l'échelle des peuplements deviennent indispensables pour éclairer ces choix stratégiques. Selon les situations, une gestion adaptative pourrait être nécessaire pour améliorer, enrichir ou transformer (par changement progressif d'essences ou des provenances) les peuplements les plus vulnérables, en premier lieu ceux qui ne sont pas adaptés aux conditions de station. Cependant dans d'autres situations, laisser des surfaces en libre évolution (sans intervention) contribue également à diversifier les modes de gestion et à favoriser les mécanismes naturels d'adaptation des forêts.

En conclusion, l'adaptation des forêts au changement climatique est une composante essentielle des équilibres écosystémiques et de l'économie bas-carbone des prochaines décennies. La prise en compte des conséquences des crises biotiques et abiotiques dans les modèles conduirait certainement à revoir à la baisse le puits carbone en 2050. Alors que S1 et S2 présentent des « marges » de puits pour atteindre la neutralité carbone, ce n'est pas le cas pour S3 et S4 : par conséquent, pour respecter la neutralité carbone, ces scénarios devraient *a priori* jouer sur plusieurs leviers : adapter à la fois les volumes et les modes de production de la filière « Bois », se donner des trajectoires plus ambitieuses en termes d'efficacité énergétique et d'intensité carbone de tous les secteurs, et développer des capacités technologiques supplémentaires de captage et stockage de CO_2.

2.3. Des besoins de connaissances complémentaires

- Affiner les projections climatiques et les impacts territoriaux sur la production et la mortalité :
  - pour l'agriculture, en déclinant l'analyse par production et par région, à l'horizon 2050 et au-delà ;
  - pour la forêt, en déclinant l'analyse selon les typologies des forêts et leur mode de gestion. La réponse des forêts face aux impacts du changement climatique dépendra beaucoup de paramètres encore incertains. Par exemple : quelles seront leurs capacités à migrer pour coloniser ? Quel rôle jouera la variabilité génétique qui est très importante chez les arbres forestiers ? Quel rôle peut jouer la gestion des forêts selon les pratiques mises en place ? ;
  - pour les sols : améliorer la connaissance des impacts du changement climatique sur les stocks de carbone dans la matière organique des sols.
- Mobiliser les données climatiques, agronomiques et sylvicoles pour analyser la robustesse des pratiques et des systèmes de production en climat changeant.
- Imaginer des évolutions transformatives (nouvelles productions, délocalisations des zones de production ?).
- En forêt, réaliser des diagnostics de vulnérabilité à l'échelle des peuplements.
- Poursuivre les développements de connaissance sur l'évolution des ressources en eau :
  - données hydro-climatiques régionalisées ;
  - solutions pour agir sur la demande en eau, intérêt des pratiques agroécologiques et des solutions d'adaptation fondées sur la nature ;
  - évaluation des impacts énergétiques et environnementaux des eaux non conventionnelles.

3. Industrie

3.1. Se projeter en 2050 : les conséquences du changement climatique

L'adaptation au changement climatique de l'industrie, et en particulier l'industrie lourde, est encore un sujet émergent et peu investigué[13] (contrairement à d'autres secteurs davantage identifiés, pour lesquels l'adaptation au changement climatique est un sujet de recherche depuis plusieurs années).

3.1.1. Analyse de la topologie du tissu industriel

Le tissu industriel français est hétérogène : actuellement les industries lourdes sont majoritairement concentrées sur des zones industrielles ou industrialo-portuaires (ex. : zones de Dunkerque, Marseille-Fos, axe Seine, etc.), ce sera encore le cas dans les quatre scénarios de Transition(s) 2050 et de manière encore plus prononcée dans S3 et S4. Cette concentration renforce les impacts que l'industrie dans son ensemble peut subir en cas d'aléas climatiques ciblés territorialement. Par ailleurs, la plupart de ces zones industrielles se situent à proximité d'axes maritimes et fluviaux (dans le but de faciliter le transport de marchandises), ce qui accroît leurs vulnérabilités aux inondations et aux submersions marines notamment.

Les industries sont aussi interdépendantes et en lien avec un grand nombre d'acteurs au travers de leur chaîne de valeur (clients, fournisseurs, réseaux de transports, d'énergie ou encore d'eau). Un aléa survenant sur une partie de la chaîne de valeur de l'industrie peut donc impacter, par effet cascade, l'activité industrielle.

Ainsi, pour se projeter en 2050 et évaluer les conséquences du changement climatique sur le tissu industriel, **les deux points d'entrée de l'évaluation des risques physiques sont les caractéristiques géographiques et la chaîne de valeur**.

3.1.2. Les risques physiques

Un aléa climatique[14] peut engendrer : des impacts directs (par exemple : conséquences des vagues de chaleur sur la santé des travailleurs) ; des impacts induits par la géographie (par exemple des inondations suite à des pluies intenses) ; des effets en cascade (par exemple un feu de forêt coupe une ligne de télécommunication et empêche le pilotage de la logistique). Les conséquences physiques de ces aléas se traduisent en impacts sociaux, économiques ou environnementaux. L'ensemble de ces risques fait partie du périmètre d'analyse *(Tableau 4)*.

13 Le projet européen IRIS (*Improve resilience of industry sector*), financé par le programme LIFE, a été précurseur pour aborder l'adaptation par grappe d'entreprises (dans le cas d'IRIS localisées en Emilie-Romagne, Italie) et en examinant leur chaîne de valeur. Voir également [C11].

14 Les aléas climatiques sont les événements ou tendances climatiques physiques (sécheresses, inondations, tempêtes, canicules, etc.) qui peuvent causer des blessures ou d'autres répercussions sur la santé, ainsi que des dommages et des pertes aux biens, aux infrastructures, aux écosystèmes et aux ressources environnementales (GIEC, 2014).

Tableau 4 *Principaux éléments de l'industrie sur lesquels pèsent les risques climatiques*

Éléments des industries sur lesquels pèsent les risques climatiques	Exemples d'impacts
Localisation géographique : • Localisation dans des zones à risque • Concentration de plusieurs sites industriels dans une même zone	La zone industrielle de Marseille-Fos est exposée à plusieurs aléas climatiques : inondations, submersions marines, retraits gonflement des argiles, vagues de chaleur et feux de forêts aux alentours.
Travailleurs *(section 1.4)* : • Santé et conditions de travail • Trajets domicile-travail et professionnels	Les vagues de chaleur et les fortes températures peuvent provoquer des baisses de l'attention, des malaises, voire des coups de chaleur. Les travailleurs les plus vulnérables sont ceux exerçant un métier physique ou à l'extérieur.
Matières premières et fournisseurs	Rupture ponctuelle de l'approvisionnement suite à une crise climatique, ou diminution tendancielle de la ressource. Les ressources particulièrement concernées sont certaines matières biosourcées et l'eau. Cela pourrait impacter par exemple la production d'hydrogène et le recours à la biomasse en tant qu'énergie décarbonée et matière première.
Réseaux (énergie, eau, télécommunication)	Des tempêtes, des feux de forêts, des inondations ou des mouvements de terrains peuvent endommager les réseaux, et affecter ainsi momentanément l'approvisionnement des industries en électricité, en eau ou en gaz, alors que la plupart des procédés industriels énergivores nécessitent un approvisionnement continu.
Transports (ferroviaire, maritime fluvial, routier et aérien) de marchandises et de personnes [C12]	Des étiages sévères peuvent rendre des cours d'eau temporairement inutilisables pour le transport fluvial. Cela été le cas du Rhin en 2018 qui a atteint des niveaux historiquement bas, bloquant les marchandises dans le port de Cologne [A5].
Offre et demande	Une augmentation des vagues de chaleur et des températures peut favoriser l'industrie du froid.

3.2. Capacités des industries à s'adapter au changement climatique dans les quatre scénarios de Transition(s) 2050

3.2.1. La démarche d'adaptation au changement climatique pour les entreprises

La démarche générique d'adaptation des activités et des chaînes de valeur repose sur plusieurs composantes [C1] [C11] [C12] [C13] :

- analyse des risques climatiques physiques : cette 1re étape de la démarche consiste à étudier les aléas, l'exposition et la vulnérabilité sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'industrie ; comprendre et anticiper les effets cascades potentiels sur les activités ;
- dialogue et coordination avec les acteurs territoriaux et la filière économique : il s'agit d'éviter les adaptations non durables, éviter les externalités négatives et favoriser les externalités positives ;
- gouvernance interne de l'industrie : au travers d'une vision de long terme, l'objectif est d'impulser le changement, garantir l'adaptation de l'outil productif et augmenter sa résilience ;
- ressources et capacités pour que l'industrie s'adapte : opérationnaliser l'adaptation en évaluant les ressources organisationnelles, financières, techniques et humaines *(Tableau 1)*.

3.2.2. Les conséquences du changement climatique remettent-elles en question les transitions industrielles ?

Dans Transition(s) 2050, nous retenons 3 grands leviers de transition communs aux quatre scénarios :

- **l'organisation industrielle et économique,** en lien avec les sites industriels, leur localisation, le commerce international et l'environnement extérieur de chaque scénario ;
- **la coordination** et le développement de **synergies** entre les acteurs industriels et ceux du territoire ;

- **les technologies et leviers de décarbonation** mobilisés dans les scénarios, c'est-à-dire le Captage et stockage du carbone (CCS), la biomasse, les réseaux électriques et de gaz, ainsi que l'hydrogène[15].

Le ***Tableau 5*** fait la synthèse des risques physiques induits sur chaque levier et des capacités d'adaptation intrinsèquement développées pour les quatre scénarios pour l'industrie lourde.

L'adaptation du système électrique, non traitée ici, fera l'objet d'une prochaine publication (*cf.* feuilleton ***Système électrique***) et complètera la vision de l'adaptation de l'industrie au changement climatique.

Le ***Tableau 5*** indique de manière synthétique que dans S1, le changement climatique ne remet pas en question les trois leviers majeurs de la transition : non seulement parce que les risques sont plus limités, comparativement aux autres scénarios, mais aussi parce que ce scénario est intrinsèquement favorable à l'émergence de capacités d'adaptation.

Les scénarios S2 et S3 sont globalement plus diversifiés. Malgré le besoin de compléments pour mieux évaluer les risques à un niveau territorial et mieux caractériser les capacités d'adaptation, notamment S2 sur l'hydrogène, ces scénarios ne sont pas remis en cause par le changement climatique.

C'est dans S4 que les risques sont plus importants sur l'organisation industrielle et économique, et restent potentiellement forts sur les technologies de décarbonation.

La suite de la section est consacrée à l'analyse des risques et capacités d'adaptation pour chacun des leviers dans les quatre scénarios.

Tableau 5 *Qualification de la résilience climatique, combinant les risques physiques et les capacités d'adaptation*

Leviers de transition		S1	S2	S3	S4
Organisation industrielle et économique		+			-
Coordination et synergies industries-territoires		+	+		-
Technologies de décarbonation	CCS	+			-
	Disponibilité en biomasse		-		-
	Gaz de réseau	+	+	+	
	Hydrogène	+	-		

Note de lecture : symbole + sur fond vert : les impacts climatiques négatifs potentiels restent relativement faibles ; fond jaune : les impacts négatifs restent modérés, les solutions d'adaptation ont un bon niveau de confiance ; symbole - sur fond orange: les risques sont probablement plus importants et ne paraissent pas encore maîtrisés.

15 Dans les scénarios Transition(s) 2050, la production d'hydrogène est limitée au reformage de gaz et à l'électrolyse de l'eau. D'autres méthodes telles que la pyrogazéification de la biomasse ou la pyrogazéification de gaz n'ont pas été incluses pour des questions de maturité ou de disponibilité des ressources. Ces technologies pourraient néanmoins être des leviers d'adaptation complémentaires pour diversifier les sources d'énergie et apporter de la résilience au système.

LEVIER 1 : ORGANISATION INDUSTRIELLE ET ÉCONOMIQUE

UNE ÉCONOMIE « MADE IN FRANCE », CIRCULAIRE ET LOCALE QUI LIMITE LES RISQUES CLIMATIQUES PROPAGÉS SUR LA CHAÎNE DE VALEUR DE L'INDUSTRIE

Dans ce scénario 1, les fortes baisses de production engendrent une profonde mutation du tissu industriel ; certains sites industriels sont susceptibles d'être fermés et d'autres maintenus parfois en sous-capacité, par exemple à des fins de conservation des emplois ou d'approvisionnement local. Par conséquent, si un aléa survient et impacte plusieurs sites d'un même secteur, ceux conservés pourraient être en capacité d'augmenter leurs volumes pour compenser l'arrêt ou le ralentissement des autres. Cette redondance peut permettre d'atténuer les risques de rupture de chaîne de valeur.

LEVIER 2 : COORDINATION ET SYNERGIES INDUSTRIES-TERRITOIRES

LA CONCERTATION PERMET D'ENVISAGER DES REPLIS STRATÉGIQUES

Dans S1, les stratégies d'adaptation des industries se préparent en coordination et en concertation avec les collectivités locales et les pouvoirs publics. Des replis stratégiques (ou relocalisation des biens et services face aux risques climatiques) peuvent être envisagés puis organisés (par exemple au travers de déconstructions et reconstructions de sites) pour certaines industries.

LEVIER 3 : TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

UN SCÉNARIO SOBRE QUI LIMITE L'UTILISATION DE TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

Le scénario S1 présente à la fois les plus fortes baisses des niveaux de production industrielle, les plus faibles consommations énergétiques et la plus grande diversité d'approvisionnement énergétique (répartition entre électricité, biomasse, gaz, hydrogène, etc.). Comparativement aux autres scénarios :

- le captage et stockage géologique du CO_2 (CCS) n'est pas développé, évitant l'exposition aux aléas climatiques et les surcoûts afférents aux infrastructures de transport ou de stockage du CO_2 ;
- la production de gaz décarboné repose sur le couplage méthanisation et *power-to-methane*. Les rendements des cultures valorisées en méthanisation dépendent au premier ordre de la ressource en eau, qui est la principale préoccupation de S1 (*cf.* ***section 2.2.3***). D'autre part, la forte dispersion sur le territoire des unités de production de gaz renouvelable permet de sécuriser l'approvisionnement en gaz. Enfin, l'existence de fortes capacités nationales de stockage (~ 120 TWh), très proches des niveaux de consommations globales annuelles de gaz, permet de gérer les variabilités de court terme. Ainsi, avec l'hypothèse d'une maîtrise des risques physiques sur les gazoducs, ce scénario présente un risque limité sur le système gaz ;
- les consommations d'hydrogène dans l'industrie (méthanol et engrais) restent stables (10,6 TWh en 2050 contre 9,7 TWh en 2019) et utilisent le réseau gaz existant.

LEVIER 1 : ORGANISATION INDUSTRIELLE ET ÉCONOMIQUE

UN COMMERCE INTERNATIONAL RÉGULÉ ET UNE ÉCONOMIE PLUS LOCALE, QUI FAVORISENT LA MAÎTRISE DES APPROVISIONNEMENTS

Dans ce scénario, comme dans S1, le dynamisme économique est majoritairement local et les circuits de proximité sont favorisés avec notamment une structuration forte des filières d'économie circulaire. Les chaînes de valeurs sont plutôt courtes, les flux peu tendus et le trafic de marchandises en baisse. Cependant, le report modal vers le ferroviaire et le fluvial (notamment pour transporter les matières premières recyclées) peut conduire à une saisonnalité marquée de la logistique (les risques sont plus marqués en été lors des canicules et périodes de sécheresse).

LEVIER 2 : COORDINATION ET SYNERGIES INDUSTRIES-TERRITOIRES

UNE STRATÉGIE D'ADAPTATION FORTEMENT CORRÉLÉE À LA STRATÉGIE DE RÉINDUSTRIALISATION DANS LES TERRITOIRES

Dans S2, la réindustrialisation conduit à réorganiser le paysage productif. Les Régions et l'État interviennent pour planifier les adaptations industrielles. La puissance publique et les industriels sont attentifs à ce que cette réorganisation priorise les lieux faiblement exposés aux aléas climatiques tels qu'inondations, submersions marines ou mouvements de terrain. En concertation avec les autres acteurs industriels, l'Écologie Industrielle et Territoriale est favorisée et intègre les risques climatiques physiques. Les Régions jouent également un rôle central pour l'adaptation des biens communs à l'intersection des secteurs économiques.

LEVIER 3 : TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

UN BOUQUET TECHNOLOGIQUE ÉQUILIBRÉ MAIS UNE DÉPENDANCE LOCALE À L'EAU POUR L'HYDROGÈNE

- Si le CCS reste relativement peu utilisé, l'intégralité du CO_2 capté est acheminée en mer du Nord. Les impacts climatiques majeures concernent alors la submersion des installations littorales, ainsi que les mouvements de terrain au niveau des gazoducs de transport de CO_2.

- La biomasse est l'un des principaux leviers de décarbonation du S2, à la fois comme matière première et comme source d'énergie, en incluant les usages de bionaphta vapocraqué[16]. La maîtrise de la consommation d'eau en agriculture dans le scénario S2, ainsi que les capacités d'adaptation du secteur agricole, devraient permettre d'assurer un stock de biomasse. Néanmoins, étant donné l'importance de la biomasse dans les hypothèses de décarbonation de S2, le risque climatique est considéré comme important.

- Comparées aux autres scénarios, les consommations de gaz réseau représentent une part importante (près de 30%) des consommations énergétiques (hors matières premières) de l'industrie. Mais comme dans S1, un foisonnement de la production et les capacités de stockage limite le risque sur le système gaz.

- Les consommateurs industriels d'hydrogène reposent uniquement sur des électrolyseurs implantés au sein même des sites. Les secteurs concernés sont la sidérurgie, les engrais et le méthanol, ainsi que le *power-to-liquid*. Ce schéma d'approvisionnement induit un double risque sur la fourniture d'hydrogène et donc la continuité du process industriel : la robustesse de l'approvisionnement électrique et surtout la disponibilité en eau sur site. L'électrolyse consomme de 10 à 20 litres d'eau par kg d'hydrogène produit. Au global, en fonction des capacités d'électrolyse installées, les volumes d'eau peuvent être conséquents, d'autant plus que l'eau consommée par les électrolyseurs doit être de grande pureté et donc purifiée : 30 à 60 Mm^3 d'eau (soit 4 % à 8 % du volume d'eau pour l'irrigation estivale en agriculture) seraient nécessaires pour produire 100 TWh, qui est le niveau de production de S2.

LEVIER 1 : ORGANISATION INDUSTRIELLE ET ÉCONOMIQUE

UN COMMERCE INTERNATIONAL DANS LEQUEL L'UNION EUROPÉENNE JOUE UN RÔLE MAJEUR DE RÉGULATION DU RISQUE

Dans ce scénario, les échanges commerciaux liés à l'industrie tendent à se concentrer dans l'Union Européenne. Étendre le terrain industriel au niveau européen combine risque et opportunité : d'une part, des chaînes d'approvisionnement plus longues sont soumises aux risques physiques sur le rail et le transport fluvial notamment en période estival ; d'autre part, la diversification des fournisseurs contribue à la résilience économique (effet de foisonnement). L'Union européenne joue ainsi un rôle majeur dans la régulation des risques et opportunités pour l'industrie.

LEVIER 2 : COORDINATION ET SYNERGIES INDUSTRIES-TERRITOIRES

UNE STRATÉGIE D'ADAPTATION PAR FILIÈRE ET COORDONNÉE AU NATIONAL

Les coopérations nouvelles développées entre les industriels, les centres de recherche, les fonds d'investissements et les politiques couvrent les enjeux d'adaptation des industries. Les pouvoirs publics accompagnent les dynamiques de changement au niveau national, au travers d'outils et de cadres inci-

16 Non comptabilisé directement dans les bilans énergétiques de l'industrie, car en bordure de périmètre.

tatifs et grâce à la modernisation des sites industriels (*via* des aides en OPEX et CAPEX), y compris pour l'adaptation au changement climatique des industries. En dehors de ces aspects, les stratégies d'adaptation des industries restent centralisées et peu coordonnées avec les niveaux régionaux ou infra-régionaux.

LEVIER 3 : TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

UNE DÉCARBONATION DU MIX ÉNERGÉTIQUE SOUTENUE PAR L'ÉTAT ET UN DÉVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES DE RÉSEAUX

Dans S3, de nombreux leviers de décarbonation sont développés autour d'infrastructures de réseaux.

- Le CCS se développe à hauteur de 10 Mt de CO_2 captées en 2050, à la fois pour un stockage en mer du Nord et sur le sol métropolitain. De ce fait, les vulnérabilités sont liées aux submersions des installations littorales, et aux mouvements de terrain au niveau des infrastructures de transport et de stockage de CO_2.

- L'industrie est assez vulnérable à d'éventuelles ruptures d'approvisionnement en biomasse : bien que ses usages énergétiques directs soient relativement faibles comparés aux autres scénarios, le vapocraquage de bionaphta est particulièrement important dans S3 et porte les usages totaux de biomasse à un niveau proche du S1. De plus, les tensions sur la ressource en eau pour l'agriculture peuvent conduire à des baisses de productivité.

- Le gaz est décarboné à hauteur de 88 % et s'appuie sur trois technologies : la méthanisation, le *power-to-methane* et la pyrogazéification (prioritairement sur déchets bois et combustibles solides de récupération). Cette diversification des moyens de production de gaz décarboné, associée aux capacités de stockage nationales de l'ordre de 120 TWh, permet de gérer les variabilités dues aux aléas climatiques.

- Les secteurs concernés par la consommation d'hydrogène sont le méthanol, la sidérurgie et les engrais. Les consommateurs industriels sont alimentés en hydrogène par une infrastructure réseau (gazoducs dédiés) associée à des capacités de stockage en cavité saline (55 TWh). Les impacts majeurs proviennent de la tension sur la ressource en eau, déjà forte sur l'agriculture (*cf.* ***section 2.2.3***) : la planification des unités de production d'hydrogène doit donc prendre en compte les risques climatiques physiques (dont submersions marines, mouvements de terrain), les contraintes de concentration des impacts environnementaux et les contraintes du réseau électrique local. Avec l'hypothèse que ces contraintes seront maîtrisées, grâce au foisonnement apporté par le réseau, le niveau de risque climatique sur l'hydrogène est moins important que dans S2.

LEVIER 1 : ORGANISATION INDUSTRIELLE ET ÉCONOMIQUE

DES ÉCHANGES TRÈS MONDIALISÉS QUI AMPLIFIENT LES RISQUES SUR LA CHAÎNE DE VALEUR DE L'INDUSTRIE

Dans S4, la consommation, la concurrence et les échanges internationaux sont accrus par rapport à S3. À flux tendus, l'industrie est globalement davantage vulnérable aux aléas climatiques, qu'ils touchent la production dans les pays exportateurs, le transport des matières premières ou des effets en cascade. Les zones portuaires renforcent leurs activités de hubs d'entrée sur le territoire et poussent au développement voire à la concentration d'autres activités industrielles. Ne pouvant organiser de repli stratégique face à l'exposition aux submersions marines, elles renforcent les infrastructures de protection mais maintiennent un niveau de risque élevé face aux événements extrêmes.

LEVIER 2 : COORDINATION ET SYNERGIES INDUSTRIES-TERRITOIRES

UNE STRATÉGIE INDUSTRIELLE LIMITÉE À LA GESTION DES RISQUES

Les industries s'appuient sur une stratégie globale renforcée de gestion des crises, notamment pour les sites industrialo-portuaires le risque de submersion marine et d'érosion du littoral : prévention, consignes de vigilance et d'alerte, reconstruction, retours d'expérience et indemnisation. Les solutions d'adaptation transformatives sont rarement mises en œuvre.

Devant la haute technicité des systèmes de gestion du risque et des niveaux d'investissement requis, des coopérations y compris transfrontalières s'organisent sur les grandes infrastructures par grandes zones géographiques : littoral de la mer du Nord contre les submersions marines, pourtour méditerranéen sur les infrastructures et marchés de l'eau (eau potable, eau non conventionnelle, eau désalinisée). Enfin, les filières industrielles sont

dépendantes de stocks de matières premières stratégiques qui, face à l'augmentation des aléas climatiques, sont gérés par la puissance publique.

LEVIER 3 : TECHNOLOGIES DE DÉCARBONATION

UNE DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE QUI REPOSE SUR UN PARI TECHNOLOGIQUE (LE CCS) ET LE DÉVELOPPEMENT D'INFRASTRUCTURES DE RÉSEAUX ASSOCIÉES

Dans S4, plusieurs leviers de décarbonation sont développés autour de nouvelles infrastructures de réseaux.

- Un pari technologique est réalisé sur le **CCS**, qui en 2050 capte 37 Mt de CO_2 sur tout le territoire. Le CO_2 est transporté *via* des gazoducs pour stockage dans de nombreux bassins de métropole, en plus d'exportations vers la mer du Nord. Les risques sont liés aux submersions des installations littorales et aux mouvements de terrain sur les infrastructures de transport et stockage de CO_2.

- L'industrie est aussi vulnérable à d'éventuelles ruptures d'approvisionnement en **biomasse** : bien que ses usages énergétiques directs soient relativement faibles comparés aux autres scénarios, le vapocraquage de bionaphta est particulièrement important dans S4 et porte les usages totaux à un niveau proche du S2.

- C'est le scénario avec la plus forte consommation de **gaz** dans l'industrie. Une grande partie du méthane est importée, ce qui augmente les risques en lien avec du transport longue distance (gazoduc ou navire). Toutefois, la diversification des sources d'approvisionnement en gaz, à la fois en production nationale par méthanisation et pyrogazéification de combustibles solides de récupération, et en importations de méthane, renouvelable ou décarboné, permet de répartir ces risques d'approvisionnement.

- La production d'**hydrogène** pour l'industrie provient en grande partie du reformage de gaz avec CCS. Le niveau de risque climatique pour l'hydrogène a donc été placé au même niveau que pour le méthane.

3.3. Des besoins de connaissances complémentaires

Les risques physiques et l'adaptation au changement climatique de l'industrie sont encore trop peu étudiés, que ce soit en termes d'impacts potentiels et territorialisés des aléas climatiques sur les différents secteurs industriels, de mesures d'adaptation concrètes ou de chiffrages des besoins d'investissements associés. Les priorités en termes de connaissances nouvelles et de méthodes concernent :

- les méthodes et données opérationnelles pour intégrer les conditions climatiques à court, moyen et long terme dans les documents réglementaires (plans de prévention des risques) ;

- des modèles d'impact sur la chaîne hydrogène ;

- des études concrètes sur des zones industrielles, des risques climatiques physiques et des mesures d'adaptation, permettant de mieux évaluer les priorités d'investissement.

- le développement d'outils cartographiques collaboratifs, permettant l'accès aux données de projections climatiques et aux indicateurs d'impacts à une maille suffisamment fine. La montée en compétence des industriels sur l'adaptation est un prérequis au développement concerté de ces outils.

4. Bâtiment et cadre bâti

Cette section est une synthèse d'études réalisées dans le cadre de Transition(s) 2050. La méthodologie et le détail des résultats sont présentés dans [B11] [C14] [C15].

4.1. Se projeter en 2050 : les conséquences du changement climatique

Le secteur des bâtiments est déjà particulièrement impacté par les aléas climatiques. Sur la période 1989-2019, ces derniers représentaient une charge de 47 milliards d'euros (à euros constants 2020) pour le secteur de l'assurance, le premier poste étant les tempêtes (43 %), suivi des inondations (19 %) et des sécheresses (18 %) [B7]. 55 % des maisons individuelles sont désormais en zone d'exposition moyenne ou forte au retrait-gonflement d'argiles (RGA) [B12].

Pour analyser les conséquences du changement climatique sur le bâtiment, il est nécessaire de :

- **documenter son exposition aux risques, c'est-à-dire sa localisation (ou non) dans une zone à risques, à présent et dans le futur.** Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une image du parc et de son emprise au sol en 2020, puis de la projeter dans les conditions de 2050. Les volumes de surfaces de plancher sont issus de la modélisation effectuée dans scénarios Transition(s) 2050 par le biais des modèles ANTONIO et VIVALDI (*cf.* chapitre ***2.1.2. Bâtiments résidentiels et tertiaires***). Ils suivent donc la philosophie propre à chaque scénario. La localisation du parc a été effectuée à la maille de la zone climatique au sens de la réglementation thermique 2012 (en agrégeant les analyses à l'échelle départementale) ;

- **comprendre sa sensibilité aux risques :** une typologie de bâtiments et de sa sensibilité aux risques a été établie, notamment avec les bases de données du programme PROFEEL et de CODA Stratégies. Elle a permis d'associer des caractéristiques telles que le type de façade, la famille de matériaux de la façade, le type de toiture, l'existence d'un sous-sol ou encore le type de fondation à un degré de sensibilité aux vagues de chaleur, retrait-gonflement des argiles et inondations.

Cette section présente une analyse d'exposition au risque[17] du parc bâti résidentiel et tertiaire en France métropolitaine en 2050 sur quatre aléas (vagues de chaleur, inondations, submersions marines et sécheresses). Deux scénarios climatiques sont utilisés : GIEC RCP 4.5 et RCP 8.5, de manière à donner une idée quantitative de la sensibilité climatique. Pour comparaison, l'année de référence considérée est l'année 2020.

4.1.1. Vagues de chaleur

Les vagues de chaleur[18] peuvent avoir un impact sur deux volets [C16] :

- **la structure du bâti, les matériaux et les réseaux** : besoin en climatisation, dysfonctionnement voire arrêt des équipements, détérioration des structures, enveloppes et réseaux de plomberie à l'origine de fuites, assèchement des plantes et du sol, dégradation de la biodiversité… ;

- **les occupants et les usages du bâtiment** : inconfort thermique, impacts sanitaires, remise en cause de l'héliotropisme et perte de valeur des biens, augmentation des besoins en équipements (systèmes de froid) et de la dépendance à l'électricité, arrêt de production, incapacité du bâtiment à fournir le service pour lequel il a été conçu…

Avec le changement climatique, les vagues de chaleur augmenteront en durée, en intensité et en fréquence. L'exposition au risque de vagues de chaleur dépend de la zone où est localisé le bâtiment : un phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) peut renforcer l'exposition. Ce dernier doit être pris en compte dans l'analyse de risque climatique : il apparaît clairement que l'exposition à ces aléas se voit augmentée en milieu urbain par rapport au milieu rural[19]. Pour représenter les ICU, les cartographies produites dans le cadre du projet MaPuce coordonné par le Centre National de Recherche Météorologiques, qui fournissent des informations sur les îlots de chaleur urbains sur 43 villes françaises, ont été utilisées.

17 Une analyse de la vulnérabilité climatique demanderait de croiser la sensibilité du parc bâti et son exposition, mais les données sur la sensibilité au risque n'existent pas encore sous forme géolocalisée.

18 Pour plus de détails sur la définition et les historiques des vagues de chaleur et canicules, voir le site de Météo-France : https://meteofrance.com/comprendre-la-meteo/temperatures/vague-de-chaleur-et-canicule-quelle-difference.

19 Par exemple, lors de la canicule de 2003, la surmortalité a été de 141 % à Paris, contre 40 % en zones rurales [B13].

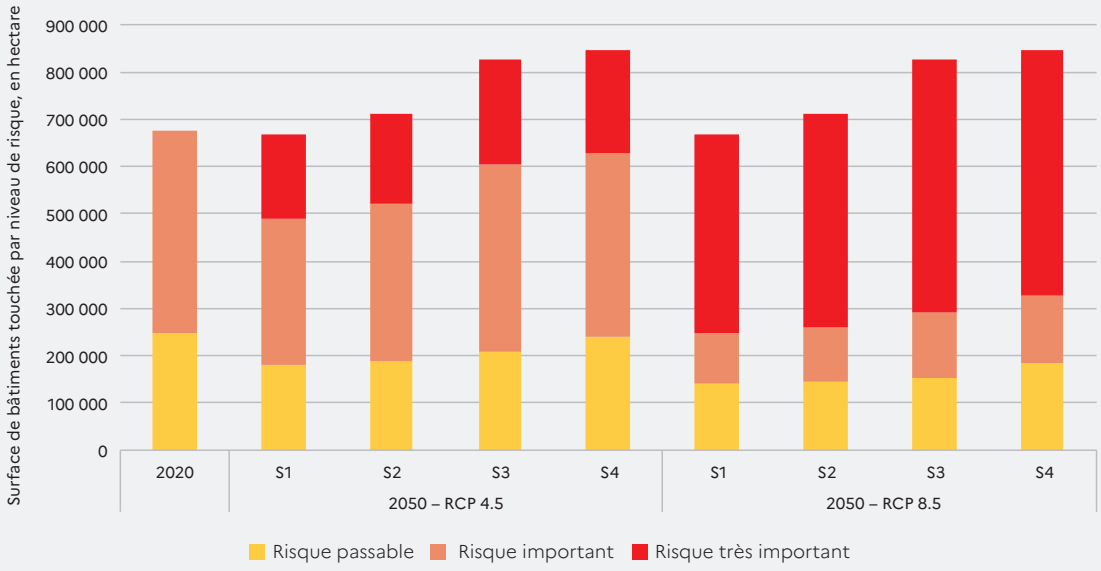
Dans notre modélisation, les différentes surfaces calculées lors de la phase de projection du bâti à 2050 ont été réparties selon le niveau de risque d'îlot de chaleur (pour les surfaces en milieu urbain) de la région climatique considérée et la projection de l'indicateur degré-jour de climatisation de DRIAS[20] également différenciée par région climatique.

Le ***Graphique 2*** montre l'évolution du risque vague de chaleur et îlots de chaleur urbain pour le parc bâti entre 2020 et 2050 pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

- La surface bâtie soumise à un risque important ou très important augmente en volume dans tous les scénarios, sous l'effet de l'augmentation du volume du parc, plus marquée dans S3 et S4. On observe une « bascule » de surfaces de la catégorie « risque important » à « risque très important » entre les 2 scénarios du GIEC quel que soit le scénario ADEME.

- Dans le scénario RCP 8.5, la proportion de surface exposées à un risque « important » ou « très important » augmente considérablement, jusqu'à atteindre 82 % des surfaces dans S3, ce qui indique **une sensibilité climatique très forte**.

Graphique 2 *Évolution de l'exposition au risque de vague de chaleur et îlots de chaleur urbains par scénario en 2050 dans RCP 4.5 et 8.5*



Note de lecture :
- Risque passable : surface bâtie localisée dans une zone à risque d'ilot de chaleur nul et non soumise à un risque fort de vague de chaleur ou localisée dans une zone soumise à un risque moyen de phénomène d'ilot de chaleur mais à un risque faible de vague de chaleur.
- Risque important ou très important : surface bâtie localisée dans une zone exposée à un effet d'îlot de chaleur urbain fort ou à un risque fort de vague de chaleur.

20 La base de données DRIAS « Les climats du futur » a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM).

4.1.2. Sécheresse et retrait-gonflement des argiles

Les sécheresses qui concernent le plus les bâtiments sont les sécheresses géotechniques, qui affectent les sols argileux sensibles aux retraits-gonflements. Ceux-ci présentent des variations de volume parfois importantes lorsque leur teneur en eau varie, en fonction des conditions climatiques et de la végétation.

La sécheresse peut avoir un impact sur deux volets [C16] :

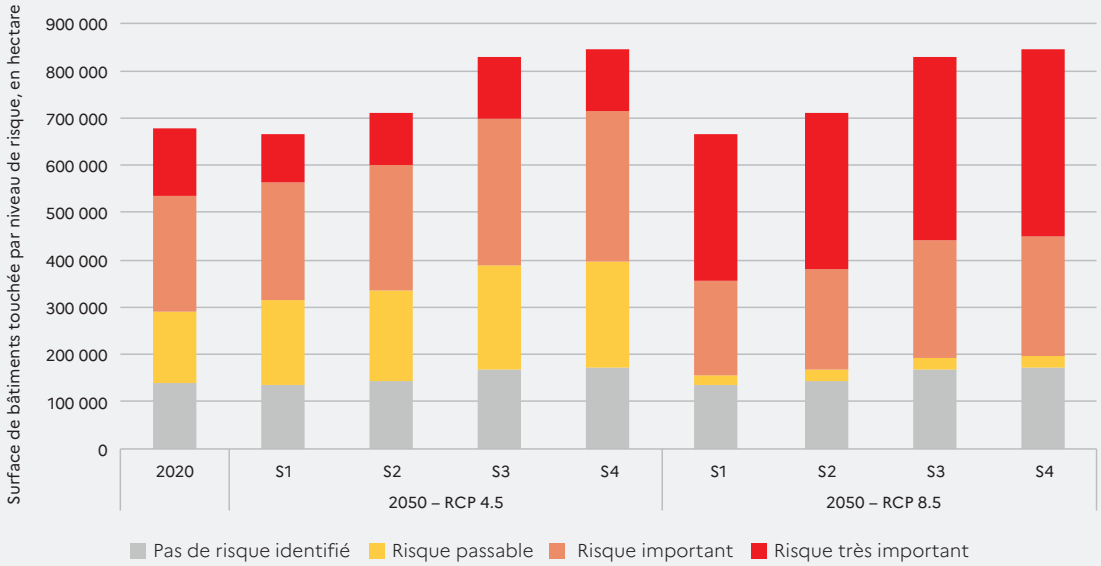
- **la structure du bâti, les matériaux et les réseaux** : apparition de fissures, remise en cause de la structure du bâtiment, décollement au niveau des éléments jointifs (terrasses…), risque de fuite des réseaux enterrés… ;
- **les occupants et les usages du bâtiment** : sécurité des usagers (fragilisation des structures), coûts de réparation des dégâts, augmentation des primes d'assurance…

L'exposition au risque sécheresses et retrait-gonflement des argiles dépend d'une part des zones géologiques (celles sujettes aux risques de retrait-gonflements des argiles) et d'autre part de l'évolution dans le temps des sécheresses des sols (estimée *via* l'indicateur DRIAS SSWI d'humidité des sols).

La ***Graphique 3*** montre l'évolution du risque sécheresse et retrait-gonflement des argiles pour le parc bâti entre 2020 et 2050 pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 :

- en valeurs absolues, la surface bâtie soumise à un risque important ou très important augmente en volume dans S3 et S4 sous l'effet de l'augmentation du volume du parc. Dans S1 et S2, elle s'oriente à la baisse dans un scénario RCP 4.5 (cela s'explique par une certaine stabilité de l'indicateur d'humidité des sols dans ce scénario), mais à la hausse dans un scénario RCP 8.5 ;
- en valeurs relatives, dans le scénario RCP 4.5, la proportion du parc soumise à un risque important ou très important est similaire à celle des années 2020. A l'inverse, dans le scénario RCP 8.5, on observe une augmentation significative de ces risques (en 2050, 77 % des surfaces du parc sont concernées, contre 50 % en RCP 4.5), ce qui est la signature d'**un effet de seuil**.

Graphique 3 *Évolution de l'exposition au risque de sécheresse et retrait-gonflement des argiles par scénario en 2050 dans RCP 4.5 et 8.5*



Note de lecture :
- Risque passable : surface bâtie localisée 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.
- Risque important ou très important : surface bâtie localisée sur une zone de risque RGA fort et/ou de sécheresses extrêmes.

4.1.3. Inondations

Une inondation, au sens large, est la submersion par les eaux d'une zone généralement émergée, due à quatre phénomènes : débordement des cours d'eau, remontées de nappes, ruissellement et submersions marines (les submersions sont traitées spécifiquement dans le paragraphe suivant). En fonction de la hauteur d'eau, de la durée d'immersion, de la vitesse du courant, de la turbidité et de la pollution de l'eau, les inondations peuvent avoir un impact sur deux volets [C16] :

- **la structure du bâti, les matériaux et les réseaux** : apparition de fissures dues aux pressions, ouvertures arrachées ou déplacées, effondrement, humidité et apparition de moisissures, modification des propriétés des matériaux par la saturation en eau… ;

- **les occupants et les usages du bâtiment** : effondrement de la structure sur les personnes, électrocution en cas de réseau mal protégé, fuite ou rupture des canalisations de gaz, dégorgement des égouts, noyade et emportement, blessure par objets flottants…

L'exposition au risque d'inondation dépend de plusieurs facteurs : il faut considérer d'une part les zones sujettes à inondation, et d'autre part l'évolution dans le temps des précipitations intenses (estimée *via* l'indicateur DRIAS PFL 90 : fraction des précipitations journalières intenses). Par ailleurs, la sensibilité aux précipitations intenses de la zone d'implantation du bâtiment se verra augmentée dans le cas d'une forte artificialisation des sols (dans le cas des milieux urbains notamment). En effet, le ruissellement augmente sur les sols artificialisés, ce qui augmente le niveau de risque face à l'aléa inondation.

La surface bâtie soumise à un risque important ou très important augmente en proportion dans tous les scénarios (d'environ 54 % en 2020 à 70 % en 2050). L'indicateur retenu pour cette étude ne permet pas de rendre compte d'une évolution importante du risque, notamment entre RCP 4.5 et RCP 8.5. En effet, il rend compte de la durée des précipitations mais pas de l'augmentation de leur intensité. Or, cette dimension nécessaire pour observer l'effet du changement climatique sur les précipitations n'est captée par aucun indicateur existant.

4.1.4. Submersions marines

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer, associées à une conjonction de condition de marées et de surélévation du niveau de la mer lors d'événements climatiques ponctuels, tels que les tempêtes, cyclones ou tsunamis. Elles peuvent se produire par débordement, rupture du système de protection ou franchissement de paquets de mer (vagues dépassant la côte de crête des ouvrages ou du terrain naturel). L'impact des submersions varie en fonction de la hauteur d'eau, de la durée de submersion, la présence de chocs mécaniques liés aux vagues et de la salinité de l'eau [C16].

Pour analyser l'exposition de bâtiments au risque de submersion marine, ont été prises en compte leur localisation (i.e. le fait d'être soumis à différents niveaux de hauteurs d'eau) et les projections d'élévation du niveau marin (issus de l'outil R*egional Sea Level Change* du BRGM).

En termes d'exposition au risque :

- l'ensemble des surfaces de bâtiments à risque en 2020 (soit 2 % du parc) devient à « risque très important » en 2050[21] ;

- on ne constate pas de différence majeure entre le scénario RCP 4.5 et 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 RCP 8.5 car la différence d'élévation ne sera perceptible qu'à un horizon temporel plus lointain.

4.2. Capacités à s'adapter au changement climatique dans les quatre scénarios de Transition(s) 2050

Les acteurs du bâtiment et de l'immobilier prennent peu à peu conscience des enjeux associés aux aléas climatiques, notamment *via* le dispositif de l'Information Acquéreurs Locataires en vigueur depuis 2006. Ces risques commencent à être capitalisés dans les marchés immobiliers. Cependant, les méthodes pour les intégrer de manière prospective dans l'évaluation immobilière sont peu développées [C17]. Par ailleurs, on assiste

21 Ce croisement ne prend en compte que l'augmentation de risque de submersions marines dans des zones déjà identifiées en tant que zones à risque par la base de données de hauteurs d'eau. Il s'agit d'une limite de cette étude car, pour être exact, il faudrait considérer les zones qui ne sont pas à risque en 2020 mais le seront progressivement dans les années à venir, jusqu'à l'horizon temporel 2050. Pour réaliser cette analyse, il faudrait croiser des bases de données de topographie (hauteur du niveau du sol) et d'élévation du niveau marin. Ces travaux ont été menés par l'organisme *Coastal Climate Central*, cependant, ces données ne sont pas en open source, et nous n'avons pas reçu de réponse à nos sollicitations.

à l'adoption rapide de certaines pratiques, comme la climatisation, en progression constante mais qui contribuent elles-mêmes au changement climatique.

Les quatre scénarios mettent en récit un ensemble d'actions adaptatives [C18] qui concernent aussi bien les acteurs de l'amont de la chaîne de valeur (conception des bâtiments, fabricants de matériaux) que les acteurs de la mise en œuvre (artisans), les exploitants et les occupants.

STRATÉGIE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La stratégie utilise au maximum les sobriétés d'usage, les solutions fondées sur la nature, les *low-tech* ou les techniques de constructions traditionnelles (brasseurs d'air, végétalisation, logements traversants dans le neuf…). L'anticipation du risque climatique est précoce et s'inscrit rapidement dans les politiques d'aménagement et de rénovation.

Les actions d'adaptation aux RGA sont mises en œuvre lors de rénovations : les actions majoritaires sont portées sur l'environnement des bâtiments pour éviter leur déstabilisation.

La maîtrise d'ouvrage s'appuie le plus possible sur les fonctionnalités des sols et des écosystèmes pour prévenir les inondations ou les submersions marines, notamment *via* la renaturation de certaines zones qui assurent l'infiltration de l'eau.

RÉTROACTIONS SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE OU LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

La consommation énergétique de la climatisation est fortement diminuée : 6 TWh/an en énergie finale (contre 20 TWh/an en 2020). Le taux de climatisation augmente pour gérer les périodes de vague de chaleur, mais tous les logements ne sont pas équipés en 2050. La rénovation a permis le choix de la meilleure technologie pour chaque logement, en cohérence avec le système de chauffage. Les climatiseurs mobiles sont moins utilisés, les PAC se développent.

Le bilan GES[22] des autres actions d'adaptation[23] en climat RCP 4.5 est approximativement équilibré, c'est-à-dire : ~ 0 $MtCO_2eq$ nettes cumulées sur la période 2020-2050[24], grâce à l'effet de puits de carbone des solutions d'adaptation fondées sur la nature (sous réserve que le changement climatique n'altère pas la capacité d'absorption des puits naturels).

STRATÉGIE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La stratégie s'appuie à la fois sur une anticipation collective des risques et la généralisation des solutions fondées sur la nature (désimperméabilisation, murs et toitures végétales, végétation pour limiter la puissance du vent aux abords du bâtiment, jardins de pluie, etc.). Les collectivités mettent en place des campagnes de sensibilisation pour l'amélioration du lien social et de la résilience collective.

En plus de solutions fondées sur la nature communes à S1, des techniques bas-carbone et préservant la biodiversité peuvent être utilisées : solutions de drainage ou bâtiments sur pilotis.

RÉTROACTIONS SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE OU LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

Comme dans S1, la consommation énergétique de la climatisation est fortement diminuée : 6 TWh/an en énergie finale (contre 20 TWh/an en 2020). L'application des principes de bioclimatisme dans les constructions neuves permet de diminuer le besoin de climatisation. Le taux d'équipement augmente cependant *via* les pompes à chaleur réversibles.

Le bilan GES des autres actions d'adaptation en climat RCP 4.5 est approximativement équilibré, c'est-à-dire : ~ 0 $MtCO_2eq$ nettes cumulées sur la période 2020-2050, grâce à l'effet de puits de carbone des solutions d'adaptation fondées sur la nature (sous réserve que le changement climatique n'altère pas la capacité d'absorption des puits naturels).

22 GES : gaz à effet de serre.
23 Première évaluation d'autres actions d'adaptation telles que : végétalisation, relocalisation, constructions biomimétiques, drainages, bâtiments sur pilotis, digues, batardeau, etc.
24 À la date de publication de ce rapport, les évaluations GES réalisées n'ont pas pu prendre en compte les derniers bouclages concernant les facteurs d'émissions des vecteurs gaz et électricité, en raison des interactions entre ces vecteurs. Les facteurs d'émission considérés sont donc constants au cours du temps. Une meilleure prise en compte des facteurs d'émission évolutifs ne modifierait pas les grandes conclusions de ce rapport.

STRATÉGIE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La stratégie s'appuie davantage sur les technologies. Les programmes de déconstruction/reconstruction permettent de privilégier le bioclimatisme (logements traversants, etc.), les technologies d'inspiration biomimétique (reconstruction de bâtiments inspirés de la nature…) ou les matériaux et fondations les plus adaptés. Des batardeaux et bâtiments sur pilotis voire flottants sont parfois aménagés sur certaines zones d'intérêt.

RÉTROACTIONS SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE OU LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

La consommation énergétique de la climatisation est en augmentation par rapport à 2020, à 23 TWh/an (énergie finale). L'application des principes de bioclimatisme dans les constructions neuves permet de diminuer le besoin de climatisation. Le taux d'équipement augmente cependant *via* les pompes à chaleur réversibles et le recours à la géothermie.

Le bilan GES des autres actions d'adaptation en climat RCP 4.5 s'élève à 42 $MtCO_2eq$ cumulées sur la période 2020-2050.

STRATÉGIE D'ENSEMBLE FACE AUX CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La stratégie repose sur une très forte technicisation (mode constructif adapté à la chaleur comme les matériaux à changement de phase, climatisation…). Une anticipation tardive de la gestion du risque pousse les acteurs à mettre en place des solutions palliatives fondées sur des technologies industrielles et des matériaux innovants (bétons renforcés, agents réparants).

Pour faire face aux risques d'inondations et de submersions, des barrières structurelles et digues sont installées. De nouveaux espaces comme des îles artificielles sont expérimentés.

RÉTROACTIONS SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE OU LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE

La consommation énergétique de la climatisation est en augmentation par rapport à 2020, à 27 TWh/an (énergie finale). La climatisation se généralise. Le parc se retrouve scindé entre une partie rénovée de façon ambitieuse, sur laquelle de nouvelles technologies très efficaces et des PAC se développent, et une partie qui suit le scénario tendanciel de rénovation dans laquelle les climatiseurs mobiles se développent.

Le bilan GES des autres actions d'adaptation en climat RCP 4.5 s'élève à 74 $MtCO_2eq$ cumulées sur la période 2020-2050. C'est dans S4 que l'empreinte carbone est la plus élevée du fait d'une surface plus importante de bâtiments à risque mais également de la construction de digues en béton générant une grande quantité de CO_2.

Ces stratégies diversifiées doivent aussi prendre en compte les caractéristiques du bâti ou de son occupation, qui sont des facteurs importants de sensibilité au risque. Par exemple, pour les îlots de chaleur, les actions prendront en compte la couleur de la toiture et de la façade, ses matériaux, ou encore le fait que le bâtiment soit un logement ou accueille du public. Autres exemples, le type de fondation influence la sensibilité du bâti au retrait-gonflement des argiles et la présence ou non d'un sous-sol, sa sensibilité aux inondations.

Ainsi en l'état des connaissances actuelles, il n'existe pas d'analyse globale de l'efficacité (unitaire ou cumulée) et des impacts (environnementaux, économiques et sociaux) des différentes solutions adaptatives. Par exemple, certaines solutions de gestion de la chaleur urbaine témoignent d'un niveau de connaissance scientifique élevé (arbres, revêtements à albédo élevé…) mais d'autres ont encore besoin d'études d'évaluation (isolation et inertie thermique, revêtements à changement de phase…) [B14].

4.3. Des besoins de connaissances complémentaires

Les priorités en termes de connaissances nouvelles et de méthodes concernent :

- les méthodes et données opérationnelles pour intégrer les conditions climatiques à court, moyen et long terme dans les documents réglementaires (plans de prévention des risques) et dans les dispositifs de financement ;

- la climatisation : les limites sont détaillées dans [C15]. Elles concernent notamment la capacité de la modélisation à intégrer les évolutions du besoin de rafraîchissement (impact de la rénovation énergétique, de l'évolution à la hausse des températures…) ;

- les risques climatiques : les limites sont détaillées dans [C14]. Les améliorations concernent :

  – la localisation du parc le plus sensible par aléa, pour le croiser avec l'exposition ;

  – la projection du parc : différencier par scénario les taux de construction dans des zones à risque, englober dans l'analyse la répartition des bâtiments par secteurs d'activité, prendre en compte la répartition de la population sur le territoire ;

  – les analyses de risque : utiliser les nouveaux indicateurs DRIAS à l'échelle des régions climatiques (sur le modèle de [C19]) ;

  – les solutions adaptatives : mieux connaître l'impact de ces solutions à l'échelle du parc.

Par ailleurs, il serait pertinent de croiser les risques pour identifier les bâtiments en zone multirisques et projeter les risques au-delà de 2050 notamment pour les risques de submersion.

5. Transports

5.1. Se projeter en 2050 : les conséquences du changement climatique

5.1.1. Les impacts sur le secteur des transports

Le secteur des transports est exposé à **quatre catégories majeures d'impacts climatiques** *(Tableau 6)* :

- l'évolution des températures, en tendance moyenne et dans les événements extrêmes ponctuels, et les impacts associés des températures sur les matériaux, matériels ou personnels exposés ;
- la hausse du niveau de la mer et le risque de submersion ou d'érosion accentuée du littoral ;
- la perturbation du cycle de l'eau, sur des événements ponctuels ou plus durables, et les conséquences sur la structure des sols ;
- les autres événements extrêmes (pluies torrentielles, cyclones en outre-mer, etc.).

L'évolution des températures moyennes ne devrait avoir que de faibles effets sur les pratiques de mobilité. Au premier ordre, l'opération au quotidien des systèmes de transport de voyageurs et de marchandises est vulnérable aux extrêmes climatiques. Les vagues de chaleur seront plus intenses, plus longues et plus fréquentes sur l'ensemble du territoire. Les épisodes de froid peuvent aussi être impactants même s'ils devraient être moins nombreux à l'avenir et moins intenses ; pour ces phénomènes, les stratégies d'adaptation sont déjà identifiées (traitement préventif des routes, pré-positionnement des matériels, réduction des vitesses de circulation, etc.).

Les principaux risques d'interruptions de trafics sont liés aux autres **événements extrêmes** (tempêtes, inondations, glissements de terrain, épisode neigeux fort, etc.), qui peuvent toucher les infrastructures de tous les modes de transport. Les conséquences des événements extrêmes sur les infrastructures peuvent être associées à des impacts potentiellement forts pour les populations concernées [B15], tels que l'apparition de zones isolées et coupées des approvisionnements de secours.

5.1.2. Impacts indirects et effets cascade

IMPACTS INDIRECTS VENANT DES PERTURBATIONS SUR LES AUTRES SECTEURS

Les transports sont au service des autres secteurs de l'économie, ils s'adaptent donc aux perturbations de ceux-ci :

- **Agriculture, alimentation et biomasse :** les transports seront la variable d'ajustement pour assurer les approvisionnements et la résilience aux chocs locaux ou plus globaux : réorganisations ponctuelles en cas de pertes agricoles suite à des événements extrêmes (sécheresses, inondations) ; réorganisation de long terme des flux inter-régionaux en fonction de l'évolution de l'agriculture. Par ailleurs, en cas de contraintes fortes sur certaines ressources biomasse, la production des biocarburants et du biogaz pourrait entrer en concurrence avec les usages alimentaires.
- **Tourisme :** de nombreuses destinations ou sites touristiques en France ou à l'étranger pourraient être impactés par le changement climatique, ponctuellement ou plus durablement. La reconfiguration des flux touristiques fait partie des stratégies d'adaptation du tourisme.
- **Électricité :** le secteur des transports s'électrifie. D'une part, il contribue à la gestion des variabilités du système électrique, ce qui est un facteur de résilience. D'autre part, il est dépendant des éventuelles perturbations de l'approvisionnement électrique. Le système électrique sera traité dans un feuilleton ultérieur.

Tableau 6 *Vulnérabilité des modes de transports aux différentes évolutions et aléas attendus en raison du changement climatique d'ici 2050*

	Décomposition des impacts par catégorie			
Modes de transport	**Évolution des températures (moyennes, canicules, épisodes froids)**	**Élévation niveau de la mer et submersion marine**	**Cycle de l'eau : sécheresses, inondations, cycle gel-dégel, mouvement de terrain**	**Autres événements climatiques sévères : tempêtes, pluie torrentielles, neige, etc.**
Voiture	• Impact direct pour les véhicules électriques : dégradation du bilan énergétique, perturbations potentielles du système électrique. • **Impact indirect : renforcement de l'usage** par inconfort des transports en commun sous forte chaleur.	Impact potentiel sur **infrastructures** routières littorales, en particulier en outre-mer.	Impact sur les **infrastructures** (coût préventif/curatif) ; peu ou pas d'adaptation véhicule.	• Impact sur les **infrastructures** routières (investissement + hausse coût entretiens). • Impact sur les **véhicules** (sinistralité). • Impact sur les **déplacements : abaissement de vitesse ou voies fermées**, jusqu'au changement de destination (espace) ou à la replanification (temps).
Modes actifs	**Renoncement** partiel au déplacement selon l'intensité/la durée de l'épisode (valable aussi en froid).		Peu ou pas d'impact sur l'usage de ces modes, sauf à l'échelle très locale.	Par nature, ces modes possèdent des **usagers vulnérables** (2-roues par ex.) et ce choix modal est très impacté au profit de modes moins vertueux comme les voitures particulières.
Transport en commun (bus, tramway)	• Problèmes de **fiabilité** des composants • Impact des **coûts** des climatiseurs.	Idem voitures.	Impact sur l'**infrastructure** (coût préventif/curatif).	Impact sur les **disponibilités,** dégradation de la fiabilité horaire + impacts économiques d'éventuels sinistres.
Ferroviaire	• Condition d'utilisation des infrastructures (dilatation des voies, contact pantographe-caténaire), abaissement de **vitesse**. • Conditions de voyage (personnels et clients) en cas de vague de chaleur.	Impact faible : quelques situations de voies proches du **littoral** potentiellement menacées.	Impacts sur l'**infrastructure**, tels que l'instabilité des talus, arrêts de circulation liés aux inondations.	• **Intégrité du réseau** ferroviaire non garantie, abaissement de vitesse opérationnelle ou interruption de circulation. • Impact géographique possible sur l'évolution à long terme de la **demande** de mobilité.
Maritime/ fluvial		• Risque de **dégradation** accrue des infrastructures. • Infrastructures non utilisables en cas de **submersion.**	Dégradation de la **navigabilité** pour le fluvial en cas d'étiages sévères.	• Dégradation de la **navigabilité** du fluvial. • Accès et fonctionnements dégradés des infrastructures portuaires vulnérables, pouvant entraîner une **relocalisation** des routes maritimes (ponctuelle ou plus structurelle selon la fréquence des intempéries ou la tenue des équipements).
Aérien	Limitation de la **masse** maximum de décollage due à des densités d'air plus faibles.	Risques de submersion sur quelques aéroports proches du **littoral.**	Impacts similaires à la route pour les **pistes** d'aéroports.	• Risques d'**annulations de vols** pour les événements les plus extrêmes, difficultés au décollage ou à l'atterrissage. • Hausse des **turbulences.**

EFFETS CASCADE DES PERTURBATIONS DU TRANSPORT SUR LE RESTE DE LA SOCIÉTÉ

Réciproquement, les perturbations des transports ont des conséquences sur l'économie et la société de manière plus générale, pouvant impacter notamment les acteurs suivants :

- **acteurs économiques :** les perturbations des transports et des chaînes logistiques peuvent se manifester par des retards, des ruptures d'approvisionnement (livraisons non assurées), une augmentation globale de l'incertitude, ou un surcoût du transport en raison de la rareté des moyens de transport à disposition ou des solutions de contournement sollicitées, entraînant des pertes économiques à plus ou moins grande échelle et échéance ;

- **usagers :** les perturbations des transports peuvent aussi se manifester par la difficulté ou l'impossibilité pour les usagers de faire certains déplacements, impactant à la fois les modes de vie et les activités économiques qui y sont liées : difficultés à se rendre au travail, faire ses courses, se rendre à ses loisirs, etc. ; les conditions météorologiques et climatiques, par la dégradation des infrastructures ou des conditions de circulation, peuvent augmenter l'insécurité, la congestion et les retards des trajets réalisés ;

- **politiques publiques :** les perturbations mobilisent du personnel et des moyens pour la gestion de crise ; les dégradations des systèmes de transport entraînent des coûts de remises en état des infrastructures ou des matériels, qui sont généralement au moins en partie pris en charge par la collectivité ;

- **résilience de la société :** le transport de marchandises semble particulièrement préoccupant pour le transport alimentaire, pour lequel des impacts très forts peuvent intervenir au bout de quelques jours à peine ; le transport de voyageurs est néanmoins structurant pour maintenir les activités des « services essentiels », tels qu'ils ont été appelés durant la Covid-19 et le 1er confinement de 2020 ; les transports sont également indispensables pour assurer la sécurité et apporter les secours nécessaires, notamment à la suite d'événements extrêmes, et leur éventuelle rupture peut amplifier la portée des conséquences initiales.

5.1.3. Le changement climatique remet-il en cause la décarbonation des transports ?

Le rapport Transition(s) 2050 a identifié 5 leviers de décarbonation des transports, plus ou moins mobilisés selon les scénarios. Une première analyse des impacts du changement climatique sur ces leviers est présentée dans le ***Tableau 7***.

La baisse de l'intensité carbone de l'énergie est un levier majeur important de décarbonation des transports. Le risque climatique majeur pesant sur les trajectoires de décarbonation du transport, notamment S1, S3 et S4, provient d'un risque d'arbitrage en faveur des cultures alimentaires si les rendements des cultures et la disponibilité en eau s'avèrent plus faibles que prévus.

Tableau 7 *Leviers de décarbonation du secteur des transports et impacts climatiques*

Leviers	Impacts climatiques sur les leviers	Conséquences pour les scénarios
Modération de la demande	• Impacts sur les destinations touristiques. • Impacts indirects si une diversification des approvisionnements est nécessaire pour compenser des ruptures d'approvisionnement local.	• Approvisionnements locaux plus impactants pour S1. • Perturbation de la logistique à flux tendus pour S4.
Report modal	• Canicules et événements extrêmes pourraient impacter en priorité les modes de transport les plus vertueux pour les voyageurs et les marchandises : ferroviaire, transports en commun ou modes actifs. • Les étiages extrêmes peuvent compliquer la logistique fluviale.	Plus impactant pour S1 et S2, *a priori* saisonnalisé (sensibilité accrue en été) et territorialisé.
Taux de remplissage	Pas d'impact significatif relevé.	Pas de conséquence significative.
Efficacité énergétique des véhicules	Pertes d'efficacité des véhicules électriques en régimes caniculaires.	Impacts ponctuels peu significatifs.
Intensité carbone de l'énergie	• Impacts sur la biomasse, qui pourraient conduire à privilégier les besoins alimentaires au détriment des biocarburants. • Impacts indirects : rupture potentielle d'approvisionnement en électricité ou hydrogène.	• Tous les scénarios pourraient être affectés par une baisse de la production de biomasse. • L'électrification du parc doit d'abord être perçue comme un facteur de résilience pour le système électrique (*cf.* le feuilleton ***Adaptation du système électrique***).

5.2. Capacités à adapter les mobilités et modes de transport au changement climatique dans les quatre scénarios de Transition(s) 2050

5.2.1. Les capacités d'adaptation selon les scénarios

Les moyens d'action pour s'adapter sont de quatre natures, comme rappelé dans le *Tableau 1*. Le *Tableau 8* synthétise dans quelles mesures les scénarios mobilisent ces moyens d'action.

Dans une démarche de gestion des risques plutôt que d'adaptation, le scénario S4 s'appuie surtout sur la technologie pour réparer les impacts climatiques au coup par coup, sans réel cadre formel. À l'inverse, les scénarios comme S2 ou S3 impliquent des concertations aux différentes échelles territoriales (S2) et un rôle d'orchestration fort par l'État ou les Régions (S3) : l'anticipation et la coordination sont des facteurs de succès de l'adaptation.

Tableau 8 Moyens et approches mobilisés pour l'adaptation selon les scénarios

	S1	S2	S3	S4
Adaptation des organisations	Moyenne	Très forte	Moyenne	Faible
Ressources technologiques	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Mobilisation de ressources humaines	Très forte	Très forte	Forte	Moyenne
Investissements financiers	Faible	Moyenne	Très forte	Forte

5.2.2. L'adaptation des transports selon les scénarios

En termes de niveaux de risques climatiques, les quatre scénarios ne sont pas très constrastés [B16] et présentent des vulnérabilités marquées sur le ferroviaire, les transports en commun et les modes actifs. Comme pour toutes les infrastructures de réseau, les effets en cascade d'aléas localisés ou les impacts indirects sont importants, d'où l'importance de stratégies pensées globalement et non uniquement à l'échelle des transports. Les stratégies d'adaptation mises en œuvre et le niveau de résilience climatique sont plus contrastés, comme indiqué dans le *Tableau 9*.

Tableau 9 Niveau de vulnérabilité et capacité d'adaptation au changement climatique selon les scénarios

	S1 GÉNÉRATION FRUGALE	S2 COOPÉRATIONS TERRITORIALES	S3 TECHNOLOGIES VERTES	S4 PARI RÉPARATEUR
Stratégie d'adaptation et de résilience axée sur :	• Démobilité et sobriété d'usage • Anticipation du risque, solidarité et entraide • Moyens financiers limités	• Sobriété d'usage et mesures locales • Les territoires et collectivités chefs de file de l'adaptation des mobilités, avec ressources humaines importantes • Infrastructures nouvelles et adaptées	• L'État à la manœuvre sur la planification de l'adaptation • Infrastructures nouvelles pensées en cohérence avec les enjeux d'adaptation	• Outils de gestion de crise focalisés sur le numérique • Peu d'anticipation

N. B. : les variations de couleur du jaune au vert foncé indiquent une amélioration des capacités d'adaptation.

Les scénarios S2 et S3, dans lesquels les **infrastructures nouvelles** sont plus importantes, permettent de construire ou de renouveler davantage d'infrastructures en tenant compte des évolutions climatiques. Ces évolutions sont moins fortes dans S1 en raison de moindres capacités d'investissements, et dans S4 en raison d'une moindre anticipation des évolutions climatiques.

Enfin, il ne faut pas négliger l'effet psychologique d'événements extrêmes répétés. Si les crises climatiques peuvent dans un premier temps pousser à s'adapter en faisant évoluer les pratiques et en renforçant les dispositifs d'anticipation, les effets en cascade de crises accentuées peuvent dépasser les populations et la puissance publique en raison de l'ampleur des pertes et dommages. C'est pourquoi les stress tests et les trajectoires d'adaptation utilisent des scénarios climatiques pessimistes tels que le RCP8.5.

5.3. Des besoins de connaissances complémentaires

Au-delà de cartographies des infrastructures à risques, notamment sur les mouvements de terrain, des connaissances complémentaires sont nécessaires pour éclairer les trajectoires d'adaptation :

- réaliser des stress-tests climatiques sur les grandes chaînes logistiques et leur vulnérabilité aux différents impacts climatiques anticipés ;
- renseigner les chroniques d'investissements prévisionnels pour les stratégies d'adaptation des transports : entretien, renforcements, replis stratégiques ;
- étudier les conséquences des vagues de chaleur dans les comportements des voyageurs : éventuels trajets annulés ou décalés, changements de mode de transport, retards ou indisponibilités d'infrastructures de transport, etc. ;
- récolter les données ex-post à l'occasion de récents évènements climatiques extrêmes (épisode caniculaire, tempêtes…), apprécier les modes de transports les plus résilients et ceux plus impactés et identifier les mesures d'adaptation prises.

6. Références bibliographiques

Pour revenir à la page contenant la première occurrence du renvoi bibliographique au sein du chapitre, cliquez sur le numéro concerné entre crochets.

POUR UNE PREMIÈRE INFORMATION

[A1] **Infographie :** *Changement climatique, il y a urgence à s'adapter* (https://multimedia.ademe.fr/infographies/adaptation-changement-climatique/).

[A2] **ADEME**, *Améliorer le confort d'été dans les établissements pour personnes âgées et handicapées*, 2009.

[A3] **Site d'infos pour les collégiens, lycéens et étudiants** : M Ta Terre : https://www.mtaterre.fr/dossiers/le-changement-climatique/comment-sadapter-au-changement-climatique.

[A4] **Guide** « S'adapter au changement climatique – Agir pour mieux anticiper les évolutions du climat » : https://librairie.ademe.fr/cadic/3710/guide-pratique-adapter-changement-climatique.pdf.

[A5] **BFM Business & AFP**, *La sécheresse met à mal le transport fluvial sur le Rhin*, 2018.

POUR UN LECTEUR AVERTI

[B1] **ADEME, Méthodes et études de cas :** « En entreprise, comment prendre des décisions pour s'adapter au changement climatique ? », 2021.

[B2] **ADEME**, *Capacités d'adaptation au changement climatique des entreprises*, 2019.

[B3] **CEPRI**, *Le secteur de la santé face au risque d'inondation*, 2018.

[B4] **Thématique Santé du Centre de ressources pour l'Adaptation au changement climatique :** https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/thematiques/sante.

[B5] **Observatoire Défense et Climat de l'Institut de Relations Internationales et Stratégiques**, *Intégration des enjeux climato-environnementaux par les forces armées*, 2020.

[B6] **I4CE,** « Adaptation : les institutions financières publiques ont (aussi) un rôle à jouer », 2021 (https://www.i4ce.org/download/adaptation-institutions-financieres-et-publiques-role-climat/).

[B7] **Fédération Française de l'Assurance**, *Impact du changement climatique sur l'assurance à l'horizon 2050*, 2021

[B8] **ANSES**, *Évaluation des risques induits par le changement climatique sur la santé des travailleurs*, 2018 (https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2013SA0216Ra.pdf).

[B9] **Institut National de Santé publique du Québec**, *Les aléas affectés par les changements climatiques : effets sur la santé, vulnérabilités et mesures d'adaptation*, 2021.

[B10] **ADEME**, *Récolte durable de bois pour la production de plaquettes forestières*, 2020 (https://www.ademe.fr/recolte-durable-bois-production-plaquettes-forestieres).

[B11] **Observatoire de l'Immobilier Durable**, « Les enjeux de l'adaptation au changement climatique du secteur immobilier dans les scénarios Transition(s) 2050 – Rapport de synthèse », 2022.

[B12] **CGDD**, *Cartographie de l'exposition des maisons individuelles au retrait-gonflement des argiles*, 2021.

[B13] **E. Cadot et A. Spira,** *Canicule et surmortalité à Paris en août 2003*, Espace populations sociétés, 2006.

[B14] **TRIBU, CEREMA, ADEME,** *Rafraîchir les villes, des solutions variées*, 2021.

[B15] **Cerema,** *Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat*, 2019 (https://www.cerema.fr/fr/actualites/vulnerabilites-risques-infrastructures-transport-face-au).

[B16] **Banque Mondiale,** *Lifelines. The Resilient Infrastructure Opportunity*, 2019 (https://www.worldbank.org/en/news/infographic/2019/06/17/lifelines-the-resilient-infrastructure-opportunity).

POUR UN LECTEUR EXPERT

[C1] **Référentiel international :** https://normalisation.afnor.org/actualites/adaptation-changement-climatique-iso-14090/.

[C2] **IPBES**, *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, 2019.

[C3] **Banque Centrale Européenne**, *Climate change and monetary policy*, 2021 (https://www.ecb.europa.eu/press/blog/date/2021/html/ecb.blog210831~3a7cecbf52.en.html).

[C4] **Rapport 2022 sur les risques globaux du Forum Économique Mondial :** https://fr.weforum.org/reports/global-risks-report-2022.

[C5] **Voir en particulier le chapitre 18** « Trajectoires de développement résilient » du rapport du GIEC, 6e rapport, groupe 2 : « Impacts, adaptation et vulnérabilité », 2022.

[C6] **Livre vert du projet Climator –** *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces*, 2010 (https://librairie.ademe.fr/produire-autrement/3893-changement-climatique-agriculture-et-foret-en-france-simulations-d-impacts-sur-les-principales-especes.html).

[C7] **A. Roux, A. Colin, J.-F. Dhôte, B. Schmitt *et al.***, *Filière forêt-bois et atténuation du changement climatique : entre séquestration du carbone en forêt et développement de la bioéconomie*, Versailles, Éd. Quae, 2020 (https://www.quae-open.com/produit/150/9782759231218/filiere-foret-bois-et-attenuation-duchangement-climatique).

[C8] **Rapport du projet LIFE AgriAdapt**, *Agriculture et Adaptation : vers une adaptation durable de l'agriculture européenne au changement climatique*, 2019 (https://agriadapt.eu).

[C9] **Rapport ONERC**, *L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change*, Rapport au Premier ministre et au Parlement de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique, La Documentation française, 2015.

[C10] **ADEME,** *Comment développer sa stratégie d'adaptation au changement climatique à l'échelle d'une filière agro-alimentaire ?*, 2019.

[C11] **Adelphi & GIZ,** *Guide méthodologique pour l'Adaptation au Changement Climatique des Zones Industrielles*, 2017.

[C12] ***World Resources Institute***, *Assessing physical risks from climate change: Do companies and financial organization have sufficient guidance?*, 2021.

[C13] **ADEME,** *Méthode d'évaluation des stratégies d'adaptation des entreprises* (version préliminaire mars 2022) (https://actinitiative.org/act-methodologies/).

[C14] **Observatoire de l'Immobilier Durable,** « Les enjeux de l'adaptation au changement climatique du secteur immobilier dans les scénarios Transition(s) 2050 – Rapport technique », 2022.

[C15] **CODA Stratégies et ADEME**, *La climatisation dans le bâtiment. État des lieux et prospective 2050*, 2021.

[C16] **Observatoire de l'Immobilier Durable**, *Fiches aléas Vagues de chaleur, Sécheresse et RGA, Inondations, Submersions marines*, 2020.

[C17] **C. Oueslati**, *L'immobilier face au risque climatique : dynamique des marchés et outils d'évaluation immobilière, Thèse professionnelle*, 2018.

[C18] **Observatoire de l'Immobilier Durable**, *Guide des actions adaptatives au changement climatique. Le bâtiment face aux aléas climatiques*, 2021.

[C19] **INSEE Normandie**, *Plus de 100 000 résidents, logements et emplois concernés par le risque de submersion marine en Normandie*, INSEE Analyses n° 87, 2020.

Le rapport Transition(s) 2050 et l'ensemble des feuilletons sont disponibles sur le site https://transitions2050.ademe.fr/

Pour suivre l'actualité sur l'adaptation au changement climatique, l'ADEME publie une veille mensuelle internationale : https://www.ademe.fr/veille-mensuelle-internationale-ladaptation-changement-climatique

Le centre de ressources pour l'adaptation au changement climatique, rassemblant également les projets locaux d'adaptation, est en ligne sur : https://www.adaptation-changement-climatique.gouv.fr/

RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

HORIZONS

FEUILLETON TRANSITION(S) 2050

« **Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat** » est une prospective qui peint quatre chemins cohérents et contrastés pour atteindre la neutralité carbone en France en 2050. Ils visent à articuler les dimensions technico-économiques avec des réflexions sur les transformations de la société qu'elles supposent ou qu'elles suscitent.

Le rapport Transition(s) 2050, première étape de cet exercice, a été publié le 30 novembre 2021. Chaque secteur y est détaillé, à savoir ceux qui relèvent de la consommation, du système productif, de l'offre d'énergie, des ressources et des puits de carbone. Il est complété par des feuilletons qui apportent un éclairage supplémentaire, en particulier sur les impacts induits.

C'est l'objet du présent ouvrage qui s'inscrit dans la continuité du chapitre « Adaptation au changement climatique » du premier rapport et pointe les leviers et les freins à l'adaptation de cinq secteurs particulièrement sensibles au changement climatique, à savoir transports, agriculture, forêt, industrie et bâtiment.

L'ensemble de ces publications est le résultat d'un travail de deux ans mené par l'ADEME en interaction avec des partenaires extérieurs afin d'éclairer les décisions à prendre dans les années à venir. Car le but n'est pas de proposer un projet politique, ni « la » bonne trajectoire mais de rassembler des éléments de connaissances techniques, économiques et environnementales afin de faire prendre conscience des implications des choix sociétaux et techniques qu'entraîneront les chemins qui seront choisis.

011799

9 791029 719585

www.transitions2050.ademe.fr