

Les enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique

anRT
ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

 **FUTURIS**

NOVEMBRE 2024

LES CAHIERS FUTURIS

Groupe de travail *Transition énergétique*

Sous la présidence d'Olivier Appert, membre de l'Académie des technologies

Co-président : Denis Randet

Co-président : Richard Lavergne

Auteur : Antoine Belleguie

Directrice de publication : Clarisse Angelier - ANRT

Les enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique

LES CAHIERS FUTURIS

Ces travaux sont soutenus financièrement par les souscripteurs FutuRIS :

AIR LIQUIDE - AMPIRIC-AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ - ANR - BERGER-LEVRAULT - BNP PARIBAS
BOUYGUES - CEA - CNRS - DECATHLON - EDF - ENGIE - FRANCE UNIVERSITÉS - GENERAL ELECTRIC
INRIA - INSTITUT MINES TELECOM - INSTITUT PASTEUR - MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS - MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
RÉGION PAYS DE LA LOIRE - RENAULT - SCHNEIDER ELECTRIC - SNCF - TOTAL ENERGIES - UDICE
VINCI

Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent son soutien.



Life Is On

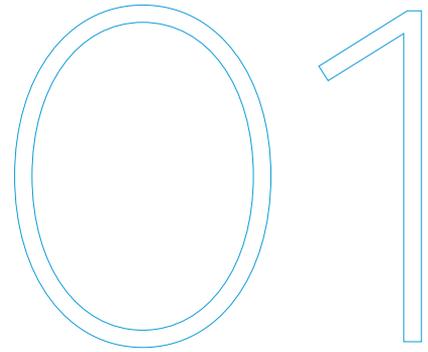


Sommaire

01. Introduction	1
1.1. Contexte et objectifs	1
1.2. Pourquoi s'intéresser aux enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique ?	1
1.3. Méthodologie	2
1.3.1. Organisation des auditions thématiques	2
1.3.2. Sélection et analyse des contributions	2
1.3.3. Approche systémique et transversale	2
1.3.4. Synthèse et rédaction du rapport	2
1.4. Structure du rapport	2
1.5. Remerciements	2
02. Cadre général de l'adaptation au changement climatique	3
2.1. Définir l'adaptation : enjeux et frontières avec l'atténuation	3
2.1.1. Enjeux de l'adaptation	4
2.1.2. Adaptation et atténuation	4
2.2. Politique nationale et internationale : PNACC et au-delà	4
2.2.1. Axes stratégiques du PNACC	4
2.2.2. Engagements internationaux et coopération	5
2.3. Enjeux économiques et sociaux de l'adaptation	6
2.3.1. Impacts économiques et financement de l'adaptation	6
2.3.2. Evaluation des coûts et bénéfices de l'adaptation	7
2.3.3. Impacts sur les secteurs économiques clés	7
2.3.4. Financement de l'adaptation	7
03. Technologies d'adaptation par secteur	9
3.1. Eau	9
3.1.1. Enjeux liés à la gestion de l'eau et au stress hydrique	10
3.1.2. Technologies de gestion et de traitement des eaux	10
3.1.3. Technologies pour les infrastructures de stockage et de transport de l'eau	11
3.1.4. Solutions et alternatives innovantes	11
3.1.5. Enjeux systémiques et gouvernance	11
3.2. Energies	12
3.2.1. Adaptations des infrastructures et solutions technologiques	12
3.2.2. Résilience des réseaux de distribution	13
3.2.3. Adaptation des énergies renouvelables	14
3.2.4. Stockage de l'énergie	15
3.2.5. Enjeux économiques et gouvernance	15
3.2.6. Innovation et R&D	15
3.2.7. Combustibles liquides et bois-énergie	16
3.3. Agriculture	16
3.3.1. Enjeux du changement climatique pour l'agriculture	16
3.3.2. Solutions technologiques pour l'adaptation en agriculture	16
3.3.2.1. Gestion optimisée de l'eau	16
3.3.2.2. Sélection végétale, agroécologie et gestion des sols	17
3.3.2.3. Gestion des micro-organismes et des sols	17
3.3.3. Technologies de surveillance et de gestion des risques	18
3.3.4. Réforme de la chaîne de valeur agricole	18
3.3.5. Enjeux économiques et sociaux	18
3.4. Villes et bâtiments	19
3.4.1. Enjeux climatiques pour la ville et le bâtiment	19
3.4.2. Solutions technologiques d'adaptation	20
3.4.2.1. Gestion des eaux pluviales et adaptation des infrastructures	20
3.4.2.2. Adaptation des bâtiments face à la chaleur au aux sécheresses	20
3.4.2.3. Solution pour la gestion des risques et inondations	21
3.4.3. Ville résiliente et planification durable	21
3.4.4. Technologies et innovations pour la mobilité urbaine	21
3.4.5. Enjeux sociaux et gouvernance	22

3.5. Industrie	22
3.5.1. Enjeux du changement climatique pour le secteur industriel	22
3.5.2. Technologies clés pour l'adaptation du secteur industriel	23
3.6. Transports	23
3.6.1. Impacts du changement climatique sur le secteur des transports	24
3.6.2. Technologies clés pour l'adaptation des infrastructures de transport	24
3.7. Santé	26
3.7.1. Enjeux pour la santé	26
3.7.2. Enjeux technologiques	27
3.7.3. Solutions technologiques pour l'adaptation	27
3.7.4. Enjeux sociaux et gouvernance en santé	28
3.8. Défense	29
3.8.1. Enjeux du changement climatique pour les opérations militaires	29
3.8.2. Enjeux géopolitiques amplifiés par le climat	29
3.8.3. Technologies clés pour l'adaptation des infrastructures et équipements militaires	29
3.8.4. Impacts et adaptation des forces armées	30
3.9. Spatial	30
3.9.1. Contributions du secteur spatial à l'adaptation	30
3.9.2. Programmes spatiaux et innovations technologiques	31
04. Synthèse des technologies d'adaptation	33
4.1. Technologies de gestion des ressources en eau	33
4.2. Technologies de résilience énergétique	34
4.3. Technologies de résilience de l'agriculture	35
4.4. Technologies d'urbanisme résilient	35
4.5. Technologies pour l'industrie	36
4.6. Technologies pour le transport	37
4.7. Technologies pour la santé	38
4.8. Technologies pour la défense	39
4.9. Technologies pour le spatial	39
05. Approche systémique et gouvernance	41
5.1. Interconnexions entre les secteurs	41
5.2. Synergies et optimisation des ressources	42
5.3. Coordination et gouvernance	42
06. Conclusion	44
6.1. Enjeux et solutions, secteur par secteur	44
6.2. Vue d'ensemble	45
6.3. Besoins de R&D	46
Annexes	48

Introduction



1.1. Contexte et objectifs

Face à l'accélération du changement climatique, l'adaptation des sociétés aux nouvelles réalités environnementales est désormais indispensable. La France, à travers son Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), se doit de répondre aux enjeux complexes liés à ces mutations. Dans ce contexte, l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) a confié en 2024 au Groupe de Travail sur la Transition Énergétique la mission de mener une investigation approfondie sur les enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique.

Depuis 2017, le GT Transition Énergétique assiste les pouvoirs publics dans l'élaboration de la Stratégie Nationale de Recherche en Énergie (SNRE), en cohérence avec la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) et la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE).

En 2024, sous la présidence d'Olivier Appert, il s'est concentré sur les technologies disponibles et les innovations susceptibles de répondre aux défis climatiques, en intégrant une approche systémique de l'adaptation, couvrant des domaines aussi variés que l'eau, l'énergie, l'industrie, l'agriculture, et l'urbanisme. Cette approche intégrée vise à identifier et promouvoir des innovations technologiques capables de renforcer la résilience des différents secteurs économiques tout en tenant compte de leurs interactions complexes. L'objectif est de proposer des stratégies concrètes qui aideront la France à adapter son économie et ses infrastructures aux nouvelles conditions climatiques.

L'objectif de ce rapport, intitulé « *Les enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique* », est double : d'une part, identifier les solutions technologiques clés pour l'adaptation des secteurs face au changement climatique; d'autre part, fournir aux décideurs, publics et privés, des recommandations stratégiques pour l'intégration efficace de ces technologies dans leurs politiques et plans d'action.

1.2. Pourquoi s'intéresser aux enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique ?

La France, comme l'ensemble de la communauté internationale, doit s'adapter aux conséquences inévitables et déjà observables du changement climatique, caractérisées par une intensification prévue des phénomènes extrêmes tels que les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur, qui auront un impact majeur sur notre économie.

Historiquement, les discussions climatiques internationales, telles que les Conférences des Parties (COP), ont privilégié les mesures d'atténuation, c'est-à-dire la réduction des émissions de gaz à effet de serre. À ses débuts, l'adaptation était parfois perçue comme une alternative à l'atténuation des émissions, mais elle est aujourd'hui une nécessité incontournable, face à l'incapacité mondiale à réduire efficacement les émissions. Cependant, face à l'intensification des événements climatiques extrêmes, il devient impératif d'adapter nos modes de vie, entraînant des transformations comportementales et sociétales profondes.

Ce défi, bien que distinct de celui de l'atténuation, revêt une importance stratégique majeure pour la préservation de l'économie et la garantie d'un développement durable. Bien que l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 demeure un pilier central des politiques climatiques, l'adaptation aux impacts croissants du réchauffement global exige la conception et la mise en œuvre de solutions technologiques innovantes et résilientes. Cela nécessite à la fois de renforcer la résilience des technologies existantes et de concevoir des innovations spécifiquement adaptées aux conditions climatiques futures.

L'intégration de ces technologies est indispensable pour construire une société résiliente, non seulement capable de relever les défis du changement climatique, mais aussi d'exploiter les opportunités d'un développement durable à long terme, tout en protégeant les populations et en optimisant les ressources essentielles.

1.3. Méthodologie

Elle consiste à recueillir, analyser, et synthétiser des contributions d'un large éventail d'experts industriels et académiques, courant des thèmes variés, mais aussi soucieux des aspects systémiques.

1.3.1. ORGANISATION DES AUDITIONS THÉMATIQUES

Les auditions thématiques des experts et les échanges avec les participants auxquels elles ont donné lieu ont permis d'identifier les défis spécifiques pour la France et de proposer des solutions technologiques concrètes.

1.3.2. SÉLECTION ET ANALYSE DES CONTRIBUTIONS

Ces contributions ont été minutieusement retranscrites et analysées. Certaines ont été enrichies par des sources complémentaires afin d'approfondir les aspects techniques.

1.3.3. APPROCHE SYSTÉMIQUE ET TRANSVERSALE

La méthodologie du GT Transition Énergétique se distingue des approches sectorielles traditionnelles, souvent limitées à une analyse spécifique des enjeux technologiques par domaine. Ici, le groupe a adopté une approche systémique en prenant en compte les interconnexions entre secteurs et technologies, afin d'identifier les synergies intersectorielles potentielles.

1.3.4. SYNTHÈSE ET RÉDACTION DU RAPPORT

À partir des comptes-rendus des plénières et des échanges subséquents, le GT a synthétisé les informations recueillies. Ce travail a été structuré pour refléter les priorités identifiées et intégrer les recommandations spécifiques émises par les experts. La rédaction de ce rapport final s'appuie donc sur une analyse rigoureuse des données et des témoignages, assurant que chaque recommandation repose sur des bases solides tant du point de vue scientifique que pratique.

Les travaux du GT ont permis de dégager plusieurs axes stratégiques d'adaptation, mettant en avant des technologies clés qui seront déterminantes pour assurer la résilience des systèmes énergétiques, la gestion durable de l'eau, l'évolution des pratiques agricoles, l'adaptation des infrastructures urbaines, et le renforcement de la santé publique face aux risques climatiques. Ces technologies ne sont pas seulement des outils de réponse aux impacts climatiques, mais aussi des leviers pour une transition durable, en s'ap-

puyant sur les atouts technologiques et industriels de la France.

Sous la présidence d'Olivier Appert, de Denis Randet et de Richard Lavergne, la coordination du processus de synthèse et de rédaction a été menée par Antoine Belleguie, qui a assumé le rôle de rapporteur du groupe pour l'année 2024.

1.4. Structure du rapport

Afin de refléter cette approche systémique, ce rapport est structuré autour de neuf thématiques :

- Eau
- Énergie
- Agriculture
- Villes et Bâtiment
- Industrie
- Transport
- Santé
- Défense
- Spatial

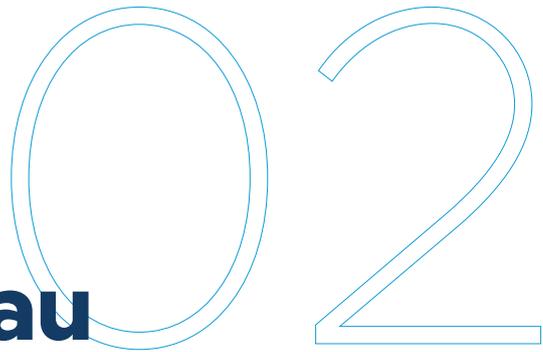
Pour chacune de ces thématiques, le rapport analyse les enjeux liés au changement climatique, les solutions technologiques existantes, leur degré de maturité, leur potentiel d'application, ainsi que les défis à relever pour leur déploiement. Une attention particulière est portée aux interactions entre ces secteurs, dans une approche systémique indispensable pour garantir une adaptation efficace et cohérente.

Le rapport se conclut par une série de recommandations stratégiques, incluant des propositions concrètes pour le développement des technologies d'adaptation, l'amélioration de la résilience des infrastructures et la coordination des efforts entre les différents acteurs publics et privés.

1.5. Remerciements

Les animateurs du groupe de travail remercient chaleureusement les nombreux intervenants, qu'ils soient membres du groupe ou extérieurs, qui ont contribué à la qualité et à la richesse de ce rapport. Leur expertise et leur engagement ont été essentiels pour identifier les enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique et proposer des solutions concrètes. La liste des intervenants est disponible en annexe.

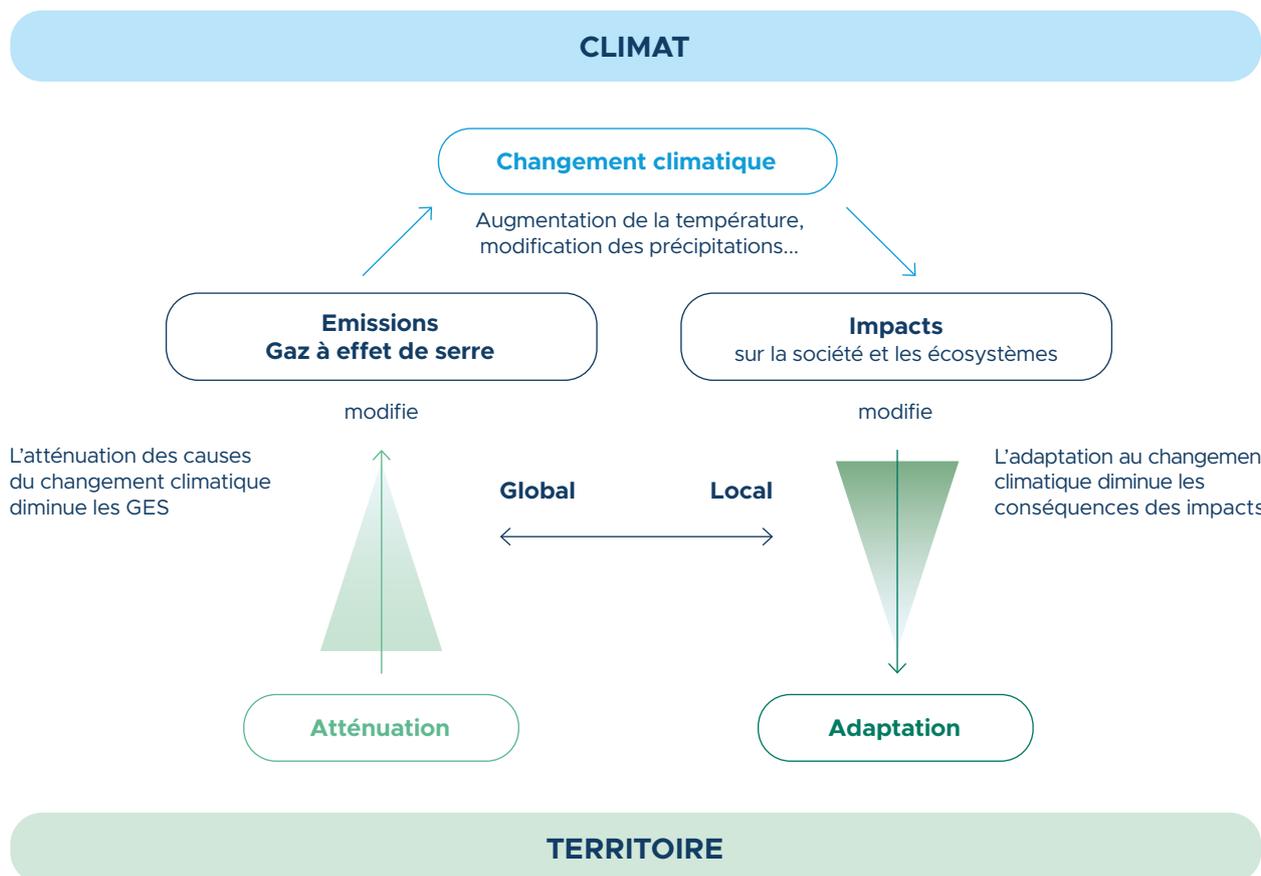
Cadre général de l'adaptation au changement climatique



2.1. Définir l'adaptation : enjeux et frontières avec l'atténuation

L'adaptation au changement climatique est un élément central des stratégies nationales et internationales de gestion des risques climatiques. Elle vise à réduire la vulnérabilité des systèmes humains et naturels aux impacts inévitables du changement

climatique, tout en renforçant la résilience des infrastructures et des écosystèmes (MTECT, 2023). Contrairement à l'atténuation, qui se concentre sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), l'adaptation s'intéresse aux effets du réchauffement avec ses effets locaux et ses multiples indicateurs. Cependant, les frontières entre adaptation et atténuation sont parfois floues, certaines technologies, procédés ou stratégies pouvant répondre simultanément aux deux objectifs.



2.1.1. ENJEUX DE L'ADAPTATION

L'adaptation au changement climatique est désormais une nécessité. Les effets de ce changement sont déjà perceptibles et vont s'intensifier dans les décennies à venir. Les modèles climatiques mondiaux ne convergent pas toujours, prévoir localement est particulièrement difficile, et la France est dans une position géographique charnière, au croisement de plusieurs influences. On aura besoin de beaucoup de données et de travail sur les modèles. En tendance à moyen-long-terme, Météo-France prévoit une augmentation des températures moyennes, des vagues de chaleur plus fréquentes, une réduction des précipitations estivales, un accroissement de la sécheresse et des précipitations hivernales plus intenses accroissant les risques d'inondations. Le troisième Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) vise à préparer la France à faire face à un réchauffement de +4°C d'ici 2100. Les enjeux d'adaptation identifiés par le PNACC 3 incluent non seulement la santé publique, la résilience des territoires, la protection des infrastructures essentielles, et la préservation de la biodiversité, mais également la protection des populations face aux événements climatiques extrêmes, la prévention des risques technologiques, la résilience de l'économie, et la protection du patrimoine culturel.

2.1.2. ADAPTATION ET ATTÉNUATION

Bien que souvent traitées séparément, l'adaptation et l'atténuation sont étroitement liées. De nombreuses technologies conçues pour atténuer le réchauffement climatique contribuent également à l'adaptation. Par exemple, l'aménagement des réseaux électriques, les smart grids et le stockage d'énergie permettent non seulement une gestion plus efficace des ressources énergétiques, mais améliorent aussi la résilience des infrastructures face aux événements climatiques extrêmes. Ces technologies facilitent l'intégration des énergies renouvelables intermittentes et permettent de mieux gérer les perturbations locales, renforçant ainsi l'adaptation tout en réduisant les émissions de GES.

L'adaptation et l'atténuation sont des stratégies complémentaires indispensables pour relever les défis climatiques. Les investissements dans les infrastructures, le bâtiment, l'agriculture et les réseaux doivent être coordonnés afin de répondre simultanément à ces deux objectifs. Cette approche systémique nécessite une coopération accrue, notamment à travers le renforcement des capacités d'observation, l'amélioration des outils de gestion des données et des modèles climatiques, ainsi que sur une meilleure gouvernance et coordination entre les acteurs concernés.

Il est difficile de dissocier clairement les investissements en atténuation et en adaptation, car ces deux approches sont souvent interconnectées. Certains investissements réalisés dans le cadre de la réduction des émissions de gaz à effet de serre (atténuation) contribuent également à l'adaptation en renforçant

la résilience des infrastructures et des systèmes face aux effets du changement climatique. Il convient également de surveiller d'éventuels effets rebond, même si ceux-ci semblent rares dans les exemples observés.

Bien que les liens entre les scénarios climatiques et leurs impacts précis sur les infrastructures énergétiques soient parfois difficiles à établir, leur intégration dans la planification est cruciale pour anticiper les risques climatiques futurs. Cette démarche est essentielle pour assurer la résilience de l'ensemble des infrastructures énergétiques, qu'il s'agisse des énergies renouvelables, des systèmes de stockage ou d'autres types d'infrastructures. Par exemple, pour les approches énergétiques, EDF s'appuie sur ces prévisions climatiques pour orienter ses décisions d'investissement, notamment en identifiant les zones les plus adaptées à l'implantation de nouvelles infrastructures, telles que les parcs éoliens.

La notion d'approche systémique est souvent évoquée comme nécessaire, mais elle est parfois mal définie. Une approche systémique efficace doit prendre en compte non seulement les interactions entre les différentes technologies d'adaptation et les secteurs, mais aussi les interrelations entre les objectifs d'atténuation et d'adaptation. Cette approche nécessite une évaluation rigoureuse des coûts et bénéfices de chaque solution technologique, en intégrant à la fois les gains en termes de résilience et les économies potentielles en matière d'émissions de GES.

2.2. Politique nationale et internationale : PNACC et au-delà

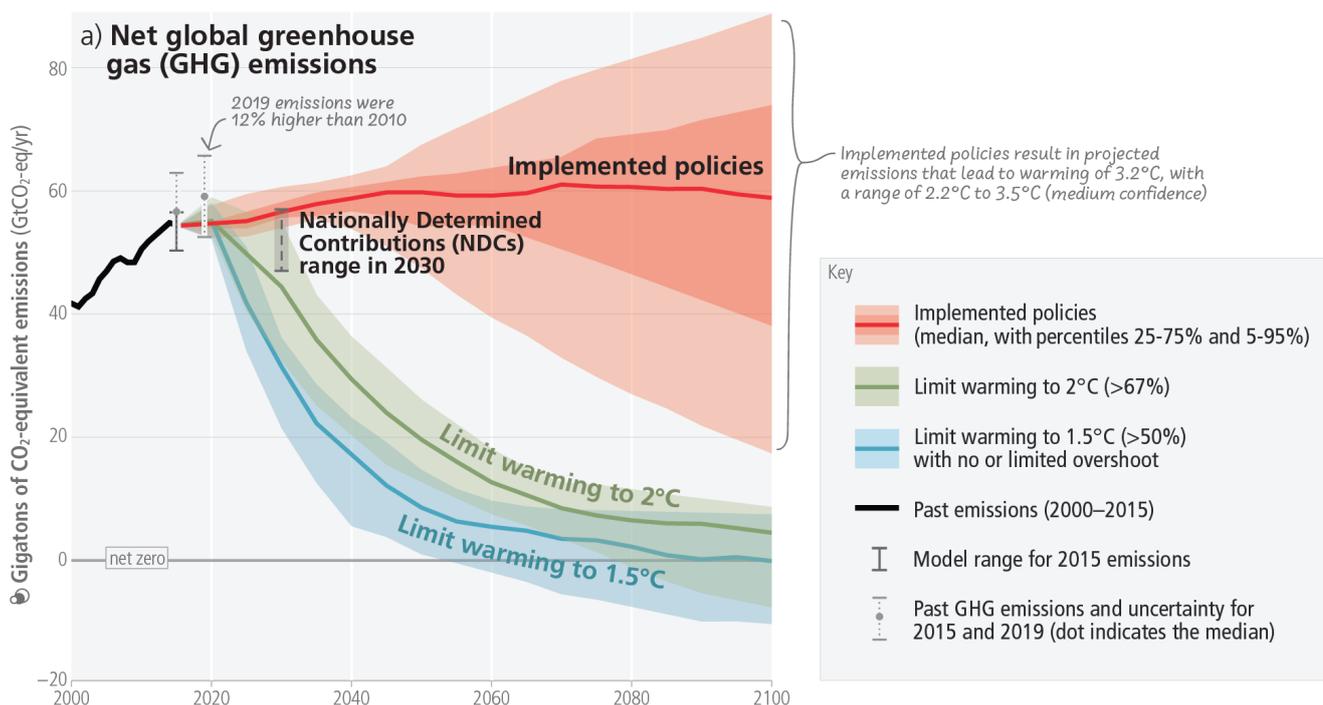
La politique d'adaptation au changement climatique, tant au niveau national qu'international, s'inscrit dans un cadre stratégique visant à répondre aux défis croissants posés par les impacts climatiques. Le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) est l'instrument clé de la France pour structurer et coordonner ses efforts d'adaptation. Ce plan s'articule autour de plusieurs axes prioritaires, intégrant des mesures spécifiques pour renforcer la résilience du pays face aux aléas climatiques futurs. À l'échelle internationale, ces efforts s'inscrivent dans le cadre plus large des engagements pris par la France et d'autres pays dans le cadre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) et des accords connexes.

Source : Rapport de synthèse du GIEC AR6 : Changement climatique (2023)

2.2.1. AXES STRATÉGIQUES DU PNACC

Le troisième Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC 3), actuellement en phase de finalisation, est conçu pour préparer la France à faire face à un réchauffement potentiel de +4°C d'ici 2100. Ce plan s'articule désormais autour de cinq axes

principaux, déclinés en 51 mesures, pour guider les efforts d'adaptation aux changements climatiques :



1. Protéger la population : Ce premier axe se concentre sur la réduction des impacts du changement climatique sur la santé publique et la sécurité des populations. Il comprend des mesures telles que le renforcement des systèmes d'alerte précoce pour les vagues de chaleur, l'installation de dispositifs de climatisation dans les bâtiments sensibles, et la prévention des risques psychosociaux et sanitaires liés aux conditions extrêmes.

2. Assurer la résilience des territoires, des infrastructures et des services essentiels : Cet axe vise à renforcer la capacité des territoires et des infrastructures critiques (énergie, eau, transport) à faire face aux événements climatiques extrêmes, tels que les inondations ou les sécheresses. Il prévoit, par exemple, la construction de digues, l'amélioration des infrastructures de protection et la création de cartographies prospectives des risques à 30 et 100 ans pour guider l'aménagement du territoire.

3. Adapter les activités humaines : L'objectif ici est d'assurer la résilience économique et de garantir la souveraineté alimentaire, énergétique et économique face aux aléas climatiques. Cela inclut l'adaptation des secteurs productifs, l'adoption de pratiques agricoles et industrielles durables, et l'anticipation des impacts climatiques sur les chaînes de production et d'approvisionnement.

4. Protéger notre patrimoine naturel et culturel : Cet axe met l'accent sur la préservation des écosystèmes et des ressources naturelles, ainsi que du patrimoine culturel. Il comprend des actions comme l'adoption de pratiques agroécologiques, l'utilisation de cultures résistantes à la sécheresse,

la gestion forestière pour limiter les risques d'incendie, et la conservation du patrimoine architectural menacé par les aléas climatiques.

5. Mobiliser les forces vives de la Nation : Ce dernier axe met en avant l'importance d'une mobilisation collective pour réussir l'adaptation au changement climatique. Il s'agit de sensibiliser et de former les citoyens, les collectivités et les acteurs économiques à l'importance de l'adaptation, tout en renforçant la gouvernance et la coordination des actions à tous les niveaux.

2.2.2. ENGAGEMENTS INTERNATIONAUX ET COOPÉRATION

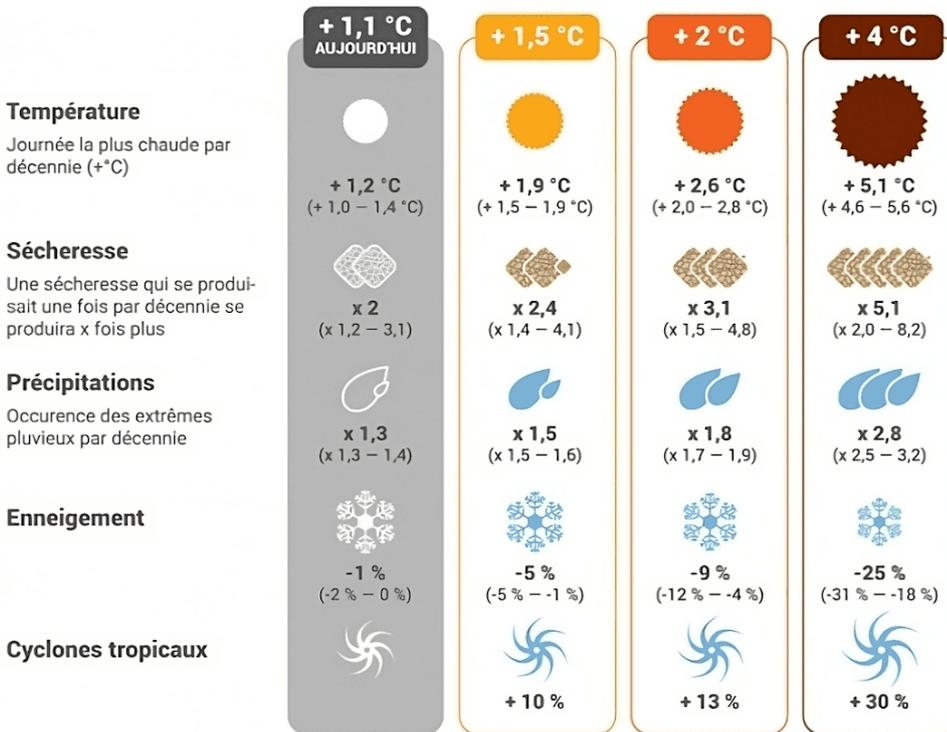
Sur la scène internationale, la France s'engage à travers son aide au développement, qui intègre de manière significative l'adaptation au changement climatique. Dans le cadre de ses engagements internationaux, cette aide vise à renforcer la coopération avec les pays en développement en partageant l'expertise technologique, en participant à des projets de recherche collaboratifs et en alignant ses actions sur les objectifs globaux de réduction des risques climatiques. Pour de nombreux pays en développement, l'adaptation est perçue comme une priorité plus urgente et accessible que l'atténuation, soulignant l'importance d'une aide au développement ciblée sur les stratégies d'adaptation.

2.3. Enjeux économiques et sociaux de l'adaptation

L'adaptation au changement climatique présente des enjeux économiques et sociaux majeurs, touchant l'ensemble des secteurs de l'économie et de la société. Les impacts du changement climatique, tels que l'augmentation des événements climatiques extrêmes, la variabilité des précipitations, et l'élévation des températures, nécessitent des réponses adaptées pour protéger les populations, préserver la cohésion sociale, et assurer la résilience des infrastructures économiques. Les coûts liés à ces adaptations, bien que considérables, sont justifiés par les dommages évités et les bénéfices apportés à court et à long terme.

CHAQUE DEGRÉ COMPTE : À QUOI S'ATTENDRE ?

Chaque fraction de degrés de réchauffement sur le globe a des conséquences importantes sur les extrêmes climatiques.



Source : Infographie de Météo-France d'après les travaux du GIEC (2023)

2.3.1. IMPACTS ÉCONOMIQUES ET FINANCEMENT DE L'ADAPTATION

Le changement climatique a un impact direct sur plusieurs secteurs économiques majeurs, nécessitant des adaptations spécifiques pour garantir leur viabilité :

- **Agriculture** : Le secteur agricole doit s'adapter à une variabilité accrue des précipitations et à des sécheresses plus fréquentes. Les mesures incluent l'irrigation optimisée, la réutilisation des eaux usées traitées, et le développement de

cultures résistantes à la sécheresse, essentielles pour assurer la sécurité alimentaire.

- **Industrie et transport** : L'industrie doit renforcer la résilience des chaînes d'approvisionnement et adopter des technologies moins vulnérables aux conditions climatiques extrêmes. Dans le transport, l'adaptation englobe non seulement les infrastructures (voies ferrées, routes) pour résister aux vagues de chaleur et inondations, mais aussi les services, afin de garantir le confort thermique dans le matériel roulant et la continuité des déplacements en période de crise. Le PNACC 3 met

ainsi l'accent sur une approche intégrée, combinant adaptation des infrastructures et des services de mobilité.

- **Bâtiment et urbanisme** : Les bâtiments et infrastructures urbaines doivent intégrer des mesures d'adaptation telles que l'amélioration de l'isolation thermique, la gestion des eaux pluviales et la réduction des îlots de chaleur urbains via une meilleure intégration de la végétation.
- **Emploi et organisation du travail** : L'adaptation générera des opportunités économiques, notamment par la création d'emplois dans les secteurs technologiques, la construction durable et la gestion des risques climatiques. Cependant, des ajustements dans l'organisation du travail seront nécessaires, notamment pour les secteurs sensibles comme l'agriculture et la construction. Le télétravail et des horaires adaptés aux conditions météorologiques joueront un rôle clé pour réduire les risques et protéger les travailleurs.

2.3.2. EVALUATION DES COÛTS ET BÉNÉFICES DE L'ADAPTATION

L'évaluation économique des projets d'adaptation reste un défi, en raison du manque de métriques pour quantifier les bénéfices à court terme. Pourtant, cette analyse est essentielle pour orienter les choix politiques et justifier les investissements. Elle doit inclure des scénarios prospectifs basés sur des prévisions climatiques pour 2050-2100, en tenant compte des incertitudes.

Les bénéfices de l'adaptation incluent la réduction des dommages matériels, la préservation des infrastructures et le maintien de la productivité économique. Par exemple, l'évaluation des ordres de grandeur des dommages évités permet de hiérarchiser les actions prioritaires, comme la réduction de la mortalité ou l'amélioration de la résilience des réseaux de transport.

2.3.3. IMPACTS SUR LES SECTEURS ECONOMIQUES CLÉS

L'évaluation économique des projets d'adaptation reste un défi, en raison du manque de métriques pour quantifier les bénéfices à court terme. Pourtant, cette analyse est essentielle pour orienter les choix politiques et justifier les investissements. Elle doit inclure des scénarios prospectifs basés sur des prévisions climatiques pour 2050-2100, en tenant compte des incertitudes.

Les bénéfices de l'adaptation incluent la réduction des dommages matériels, la préservation des infrastructures et le maintien de la productivité économique. Par exemple, l'évaluation des ordres de grandeur des dommages évités permet de hiérarchiser les actions prioritaires, comme la réduction de la mortalité ou l'amélioration de la résilience des réseaux de transport.

2.3.4. FINANCEMENT DE L'ADAPTATION

L'adaptation au changement climatique implique des investissements significatifs dans les infrastructures, la R&D et la formation des acteurs concernés. Selon le rapport de l'Institut de l'Économie pour le Climat (I4CE), les besoins d'investissement sont estimés à plusieurs milliards d'euros par an, répartis sur différents secteurs :

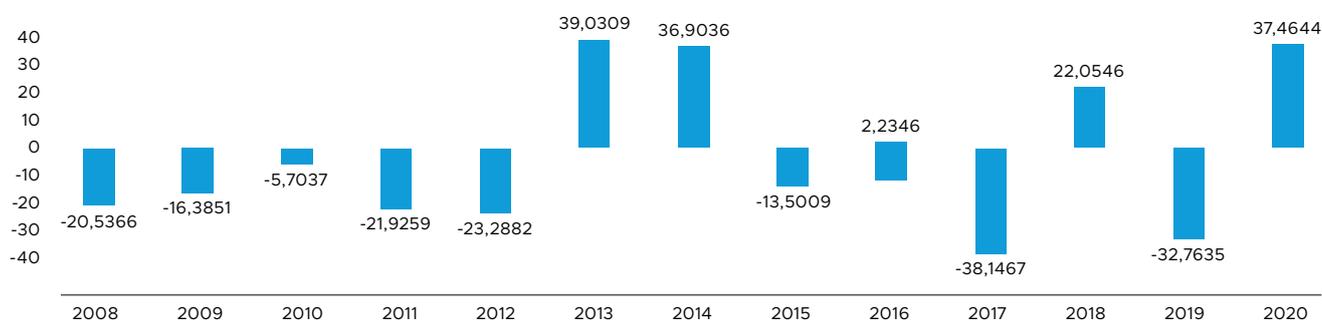
- **Bâtiments** : Entre 1 et 2,5 milliards d'euros par an pour la construction neuve, et jusqu'à plusieurs milliards pour la rénovation du parc existant une fois les efforts de rénovation énergétique à maturité.
- **Transports** : Quelques centaines de millions à plusieurs milliards d'euros par an pour moderniser les infrastructures routières et ferroviaires.
- **Agriculture** : Jusqu'à 1,5 milliard d'euros par an pour maintenir les rendements face aux défis climatiques.

Ces chiffres ne prennent pas en compte les efforts indirects mais significatifs déjà engagés. Par exemple, EDF modernise ses réseaux électriques pour les rendre plus résistants aux aléas climatiques, tandis que SNCF Réseau adapte ses infrastructures ferroviaires à travers des cycles de régénération planifiés. Ces initiatives, bien que non explicitement classifiées comme «adaptation», jouent un rôle clé dans la résilience.

Technologies d'adaptation par secteur

3.1. Eau

L'eau est une ressource essentielle à la vie, tant pour l'homme que pour les écosystèmes. Le changement climatique exerce une pression croissante sur les ressources en eau douce, impactant à la fois leur disponibilité et leur qualité. En France, les variations des précipitations, l'élévation des températures, l'augmentation de l'évaporation, et la variabilité des régimes hydrologiques aggravent les phénomènes de sécheresse, d'inondation et de stress hydrique¹. Ces problématiques nécessitent des solutions technologiques adaptées pour préserver les ressources et sécuriser l'approvisionnement en eau dans un avenir où ces phénomènes extrêmes deviendront plus fréquents. Ce chapitre se penche sur les enjeux, les défis et les solutions technologiques pour l'adaptation du secteur de l'eau en France aux nouvelles conditions climatiques.



Source : SDES - Évolution de la ressource en eau renouvelable en France par rapport à la moyenne (année hydrologique). La ligne 0 représente la moyenne 1990-2020 de 211 milliards de m³ (2021)

¹ Situation dans laquelle, dans une zone géographique déterminée, la demande en eau dépasse les ressources en eau disponibles.

3.1.1. ENJEUX LIÉS À LA GESTION DE L'EAU ET AU STRESS HYDRIQUE

Défis liés à la gestion de l'eau : L'eau est une ressource vulnérable face aux conséquences du changement climatique.

En France :

- En France, **32 % de l'eau potable provient d'eau de surface** (2022) mais **90 % des points de captage puisent dans des eaux souterraines**. Toutefois, dans certaines grandes villes comme Paris, l'approvisionnement est réparti à parts égales en volume entre les eaux souterraines et superficielles.
- Les fuites dans le réseau de distribution, qui s'étend sur **900 000 km**, entraînent **des pertes moyennes de 18,7%** de l'eau injectée dans les réseaux, correspondant à un coût moyen de **520 euros** par foyer et par an. Il est à noter que ce chiffre de 18,7% cache de fortes disparités d'une ville à l'autre.

Dégradation qualitative et quantitative de l'eau :

L'impact du changement climatique sur la qualité et la quantité des ressources en eau est une préoccupation majeure. Plusieurs facteurs aggravants ont été identifiés, notamment :

- **Prolifération des cyanobactéries :** En raison de l'augmentation des températures au-delà de 17°C, les cyanobactéries et autres bactéries prolifèrent dans les réseaux d'eau, menaçant la qualité de l'eau potable.
- **Eutrophisation² et désoxygénation :** Ces phénomènes croissants nécessitent des technologies de réoxygénation des plans d'eau et la reconstitution des réserves naturelles.
- **Pollution chimique :** En période d'étiage³, les concentrations de polluants, notamment ceux provenant des pesticides et des produits chimiques agricoles, augmentent, imposant le développement de nouvelles méthodes de traitement des eaux usées.
- **Stress hydrique :** La France traverse régulièrement des périodes de sécheresse prolongée, qu'elles soient météorologiques, édaphiques ou hydrologiques⁴. En 2024, environ 20% des terres agricoles françaises sont affectées par le stress hydrique, rendant nécessaire l'adoption de pratiques agricoles et d'irrigation plus efficaces.

2 Enrichissement excessif en nutriments (nitrates et phosphates), entraînant une prolifération d'algues, une baisse d'oxygène et la dégradation de l'écosystème aquatique.

3 Période de l'année où le débit d'un cours d'eau, d'une rivière, ou d'un lac, est au plus bas.

4 Sécheresse météorologique : manque de précipitations, sécheresse édaphique : assèchement des sols, sécheresse hydrologique : baisse du débit des cours d'eau, des nappes ou des retenues.

3.1.2. TECHNOLOGIES DE GESTION ET DE TRAITEMENT DES EAUX

Diverses technologies, tant matures qu'innovantes, ont été identifiées pour améliorer l'efficacité et la durabilité de la gestion des ressources en eau. Ces solutions nécessitent des analyses de cycle de vie approfondies pour évaluer leurs impacts énergétiques nets, notamment dans un contexte où l'énergie reste majoritairement non décarbonée :

- **Micro-irrigation et irrigation intelligente :** L'optimisation de l'irrigation est une priorité pour réduire la consommation d'eau et adapter les usages, tout en maintenant les rendements agricoles. L'adoption de systèmes de gestion automatisée de l'eau, appuyés par des technologies avancées telles que les capteurs IoT⁵, l'intelligence artificielle (IA), et les images satellitaires, peut permettre d'ajuster la quantité d'eau nécessaire en fonction des besoins des cultures, et ainsi de réduire la consommation d'eau de 30 % à 40 % tout en assurant un rendement équivalent. Ces technologies permettent de surveiller en temps réel l'humidité du sol et de déclencher l'irrigation uniquement lorsque cela est nécessaire, évitant ainsi le gaspillage de ressources.
- **Réutilisation des eaux usées traitées :** La réutilisation des eaux usées traitées est un procédé prometteur pour compenser les déficits en eau. La réglementation sur la réutilisation des eaux usées traitées (REUT) a été harmonisée à l'échelle européenne pour les usages agricoles, suite au règlement européen de 2020. En France, des décrets et arrêtés récents ont complété ce cadre réglementaire dans le prolongement du Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique de 2022. Cependant, il reste des défis, notamment liés à la distance géographique entre les zones urbaines de production de ces eaux non conventionnelles et les zones rurales de demande, rendant parfois leur transport difficilement viable. Actuellement, environ 30% des rivières en France sont alimentées par les stations d'épuration, soulignant l'importance de cette pratique pour maintenir les débits fluviaux, notamment en période de sécheresse. En France, la réutilisation des eaux est soigneusement encadrée afin d'éviter les conflits entre usagers (autorisation préfectorale), préserver le milieu naturel (eau, sol) et la santé humaine (plante et aérosols).
- **Dessalement de l'eau de mer :** Le dessalement est considéré comme une solution potentielle pour les régions côtières souffrant de pénuries d'eau. Bien que peu utilisé en France, cette technologie pourrait être envisagée à long terme, notamment dans un contexte de changement climatique où la rareté de l'eau douce est exacerbée. Néanmoins, le dessalement de l'eau de mer, bien que crucial pour répondre aux pénuries, présente des défis. Par exemple, l'osmose inverse produit

5 Internet of Things : réseau d'objets physiques connectés à internet et capables de collecter, d'échanger et transmettre des données.

une eau trop pure, nécessitant une reminéralisation pour éviter qu'elle ne devienne agressive pour les canalisations métalliques, comme cela a été observé à Barcelone. Il est donc impératif d'intégrer ces technologies dans une stratégie globale.

- **Recharge des nappes phréatiques** : Face à la réduction de la disponibilité de l'eau, la recharge artificielle des nappes phréatiques est une autre solution d'adaptation. Des techniques comme l'injection directe d'eau traitée ou la création de bassins d'infiltration sont désormais largement utilisées notamment aux États-Unis, en Australie et en Israël. Ces méthodes permettent de maintenir une ressource en eau durable même en cas de sécheresse prolongée.
- **Outils de gestion des eaux** : Il est essentiel de prévoir des outils de gestion pour anticiper les conflits d'usage de l'eau, notamment avec la fin des réserves glaciaires qui affectera les débits des cours d'eau en été. La gestion durable des eaux souterraines devient une priorité politique essentielle.

3.1.3. TECHNOLOGIES POUR LES INFRASTRUCTURES DE STOCKAGE ET DE TRANSPORT DE L'EAU

Le changement climatique ne se manifeste pas uniquement par la sécheresse. Les événements climatiques extrêmes, comme les inondations, les crues et les feux de forêt, nécessitent des adaptations spécifiques dans la gestion des infrastructures hydrauliques.

- **Modélisation des précipitations et dimensionnement des réseaux** : La modélisation précise des précipitations futures est cruciale pour adapter les infrastructures hydrauliques aux nouvelles réalités climatiques. En France, des outils de modélisation sont développés pour simuler les événements extrêmes tels que les pluies diluviennes, permettant ainsi de dimensionner correctement les réseaux de gestion des eaux pluviales et d'assurer leur efficacité à long terme.
- **Réduction des fuites dans les réseaux d'eau** : L'amélioration des infrastructures et la mise en place de technologies de détection des fuites sont essentielles pour réduire ces fuites, en particulier dans les zones rurales où les réseaux sont plus étendus et donc plus difficiles à entretenir.
- **Stockage des eaux pluviales et recharge des nappes phréatiques** : Le stockage en surface ou dans les nappes souterraines est devenu crucial pour garantir une disponibilité continue de l'eau durant les périodes de sécheresse. Des réservoirs de surface sont utilisés pour capter et stocker les eaux pluviales, tandis que la recharge artificielle des nappes phréatiques permet de maintenir un équilibre hydrologique. Pour recharger les nappes phréatiques, des techniques comme l'injection directe et les bassins d'infiltration doivent également être intégrées aux stratégies d'adaptation, tout en surveillant la qualité de l'eau.

- **Adaptation des infrastructures aux feux de forêt** : Les incendies de forêt posent un risque direct pour les infrastructures hydrauliques, en particulier dans les zones où l'eau potable est pompée depuis des réservoirs souterrains. Il est nécessaire d'adapter les infrastructures pour garantir un approvisionnement continu en eau potable même en période de crise.

3.1.4. SOLUTIONS ET ALTERNATIVES INNOVANTES

- **Gestion de la qualité de l'eau** : Le changement climatique exacerbe la dégradation de la qualité de l'eau, notamment à cause de l'augmentation des polluants et des rejets d'eaux usées. Des recherches sur l'écologie microbienne des réseaux et sur la prolifération des bactéries en raison de la hausse des températures sont en cours pour prévenir des problèmes de santé publique et protéger les infrastructures hydrauliques contre l'obturation par des biofilms⁶. Il est impératif de renforcer la recherche sur l'impact de la qualité de l'eau, mais également de l'air et des sols, sur la santé humaine dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.
- **Catalogue des actions de gestion de crise** : Un catalogue des actions de gestion de crise, incluant des mesures de sobriété (par exemple, la restriction de l'arrosage des jardins ou l'interdiction des piscines privées), est en cours de développement pour répondre aux situations d'urgence liées aux pénuries d'eau.
- **Dessalement de l'eau** : Le dessalement de l'eau de mer représente une solution d'avenir pour faire face à la raréfaction des ressources en eau douce en France, bien qu'il ne soit pas encore déployé à grande échelle dans le pays. Il s'agit d'une option sérieusement envisagée pour l'avenir, surtout face aux étés de plus en plus secs et chauds. Néanmoins, cette solution nécessite des investissements importants et des avancées technologiques pour la rendre économiquement viable et moins énergivore. Par ailleurs, un autre défi concerne le traitement et la valorisation de la saumure résultant du dessalement. Le rejet en mer de cette saumure peut avoir des impacts environnementaux, particulièrement si les quantités augmentent avec le développement du dessalement.

3.1.5. ENJEUX SYSTÉMIQUES ET GOUVERNANCE

- **Gouvernance fragmentée et coordination des acteurs** : La gouvernance de l'eau en France est fragmentée, avec plus de 12 000 services d'assainissement dispersés à travers le territoire et opérant de manière indépendante. Cette fragmentation complexifie la coordination et la mise

6 Couche de micro-organismes qui adhèrent à une surface et entre eux.

en œuvre de politiques cohérentes au niveau national pour l'adaptation au changement climatique. Des dispositifs existent, tels que les agences de l'eau, les comités locaux de l'eau, et les PTGE. Un investissement accru en R&D, en infrastructures, et en animation serait nécessaire pour renforcer cette gouvernance, même si le programme France 2030 a apporté un soutien financier. Par ailleurs, une réflexion sur la sobriété des usages est cruciale pour préserver la souveraineté économique et la protection de l'environnement, avec l'eau étant un intérêt général dans le droit français. La réglementation peut donc agir à la fois comme levier et comme contrainte pour la gestion durable des ressources hydriques. Un effort important est nécessaire afin de renforcer la coopération entre les différents acteurs pour garantir une gestion cohérente et efficace de la ressource en eau. Une interconnexion des services d'eau potable permettrait de renforcer la résilience en cas d'accidents ou de perturbations. Une campagne nationale de prévention et de sensibilisation à la gestion de l'eau est essentielle, en mettant en avant les spécificités locales des crises de l'eau et en encourageant des comportements responsables.

- **Appropriation et réforme de la chaîne de valeur** : L'adaptation nécessite non seulement des innovations technologiques, mais aussi une révision complète de la chaîne de valeur de l'eau, y compris une meilleure répartition spatiale des cultures et une réévaluation des usages de l'eau. L'appropriation par les parties prenantes, notamment les agriculteurs et les collectivités locales, est essentielle pour assurer le succès des initiatives d'adaptation.

Le changement climatique impose des défis considérables à la gestion des ressources en eau, tant en termes de quantité que de qualité. L'adaptation dans le secteur de l'eau repose sur un ensemble de technologies et de stratégies visant à gérer de manière durable une ressource de plus en plus précieuse face aux défis climatiques. Les solutions technologiques, qu'il s'agisse de l'amélioration de l'efficacité des réseaux d'irrigation, du stockage de l'eau, ou encore du dessalement, seront essentielles pour assurer une gestion durable de cette ressource vitale.

3.2. Energies

L'énergie est un secteur critique dans le cadre de l'adaptation au changement climatique. Le besoin de maintenir une production d'énergie suffisante, abordable et durable, tout en minimisant l'impact environnemental, nécessite des innovations technologiques. Les principaux défis incluent l'augmentation des températures, les événements météorologiques extrêmes, et la gestion et disponibilité des ressources naturelles comme l'eau. L'adaptation du secteur énergétique est cruciale pour garantir la continuité

de la production et de la distribution d'énergie, ainsi que pour maintenir la résilience des infrastructures énergétiques. Ce chapitre explore ces enjeux à travers une analyse des solutions technologiques mises en place pour renforcer la résilience du secteur de l'énergie face aux changements climatiques.

3.2.1. ADAPTATIONS DES INFRASTRUCTURES ET SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Le changement climatique a des répercussions importantes sur l'ensemble du secteur énergétique, notamment :

- **Résistance et sûreté des infrastructures** : La résilience des infrastructures énergétiques face aux événements climatiques extrêmes, tels que les tempêtes, les inondations et les vagues de chaleur, constitue un enjeu majeur. Les centrales nucléaires, par exemple, font l'objet de revues décennales permettant d'évaluer leur capacité à résister à ces aléas, d'actualiser les mesures de protection et d'intégrer des dispositifs spécifiques à la gestion des crues. Des mesures de sûreté, comme le rehaussement des digues, sont mises en œuvre pour protéger les installations contre les risques accrus liés aux variations climatiques. Les infrastructures de transport d'électricité, comme les lignes à haute tension, sont également vulnérables, notamment en raison de la dilatation thermique des câbles lors des vagues de chaleur, qui peut entraîner une réduction de leur efficacité ou augmenter les risques de défaillance. Ces défis nécessitent le développement de technologies adaptées pour renforcer la robustesse des infrastructures, améliorer la résistance des équipements face aux événements extrêmes, et élargir les critères de sûreté pour anticiper les conditions climatiques futures.
- **Gestion des ressources en eau** : L'approvisionnement en eau est un facteur clé dans un contexte de raréfaction des ressources hydriques, en particulier pour les centrales thermiques et nucléaires à l'intérieur des terres qui peuvent nécessiter de grandes quantités d'eau pour leur refroidissement. La baisse des précipitations et l'évaporation accrue affectent les niveaux des rivières et réservoirs utilisés pour ces besoins. Outre l'amélioration des systèmes de refroidissement et des rejets thermiques, EDF envisage des travaux visant à optimiser la gestion et la disponibilité de la ressource en eau. Parallèlement, des technologies émergentes, telles que les Small Modular Reactors (SMR), pourraient à terme réduire la consommation d'eau grâce à leur puissance plus faible.
- **Production d'électricité** : Les variations climatiques, notamment la modification de la saisonnalité des précipitations et la réduction du stock neigeux, influencent directement la production d'électricité hydraulique. Dans certaines régions, ces changements peuvent s'accompagner d'une augmentation ou d'une diminution des précipitations globales, selon les dynamiques locales. Les

périodes de sécheresse impactent aussi directement la production d'électricité dans les centrales thermiques, où les pertes de rendement liées au cycle de Carnot sont exacerbées par des températures extérieures élevées. Il est important de différencier la consommation énergétique interne liée aux systèmes eux-mêmes (par exemple, les pertes d'énergie dans les systèmes de refroidissement ou les STEP) et la demande énergétique finale des utilisateurs, afin de mieux évaluer les besoins énergétiques globaux et les mesures d'adaptation nécessaires. Des mesures ont été mises en œuvre pour limiter l'impact environnemental de la production sur les rivières et les écosystèmes aquatiques, ce qui peut entraîner une réduction de la production durant certaines périodes. Ces solutions incluent également la révision des normes de rejet de chaleur dans les cours d'eau pour éviter des perturbations écologiques. Globalement, il est nécessaire de prévoir une capacité de production suffisante pour faire face aux nouvelles conditions climatiques, en tenant compte de l'ensemble des impacts des variables météorologiques, telles que l'évolution des températures, des précipitations, de la nébulosité et des régimes de vent, qui influencent la gestion de l'équilibre entre production et consommation.

3.2.2. RÉSILIENCE DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION

Le stockage d'énergie et la résilience des réseaux sont essentiels pour assurer la continuité de l'approvisionnement énergétique face aux événements climatiques imprévisibles. La modernisation des réseaux électriques permettra de mieux anticiper et gérer les incidents liés aux événements climatiques extrêmes :

- **Enfouissement des lignes électriques** : L'enfouissement des lignes à moyenne tension est une stratégie clé pour améliorer la résilience du réseau face aux événements climatiques extrêmes. Enedis prévoit par exemple d'enfourir environ 100 000 km de ses lignes à moyenne tension d'ici 2050. L'enfouissement permet de réduire la vulnérabilité du réseau aux événements climatiques extrêmes, comme les tempêtes et canicules, tout en assurant la continuité de la distribution d'électricité.
- **Résilience des réseaux de gaz** : Les réseaux de distribution de gaz bénéficient d'une résilience accrue grâce à leur enfouissement sous terre, ce qui les rend peu sensibles aux intempéries. Cependant, ils restent vulnérables aux inondations, surtout en cas de montées subites des eaux. GRDF a engagé des travaux pour anticiper et atténuer les effets du changement climatique sur ses infrastructures, notamment en évaluant les impacts potentiels d'une hausse des températures et des inondations sur l'exploitation des réseaux. Au-delà de l'électricité, des efforts significatifs sont nécessaires pour adapter les infrastructures gazières, les terminaux LNG et les technologies de captage et stockage du carbone

(CCS), qui représentent des leviers stratégiques pour une transition énergétique résiliente et décarbonée.

- **Développement des smart grids (réseaux intelligents)** : La digitalisation du réseau électrique à travers des technologies comme les smart grids permet une gestion optimisée des flux d'énergie et facilite l'intégration des énergies renouvelables ainsi que des nouveaux usages, tels que la mobilité électrique et le stockage d'énergie. Ces réseaux intelligents contribuent également à l'optimisation des charges et renforcent la résilience des infrastructures face aux perturbations. Leur développement nécessite toutefois une coordination intersectorielle renforcée pour maximiser leur efficacité et leur impact. Par ailleurs, des méthodes basées sur l'intelligence artificielle et l'exploitation de données géolocalisées, indépendamment des smart grids, peuvent jouer un rôle clé dans l'anticipation des impacts des événements climatiques extrêmes et la gestion des crises, en complément des fonctions des réseaux intelligents.
- **Solutions innovantes pour la résilience du réseau** : L'utilisation des microgrids (micro-réseaux autonomes) peut contribuer à améliorer la résilience du réseau électrique sous certaines conditions, en assurant une alimentation locale continue en cas de perturbations majeures du réseau principal. Cependant, ces solutions ne constituent pas, à elles seules, une réponse directe aux enjeux d'adaptation au changement climatique. Par ailleurs, le développement des énergies renouvelables nécessite un renforcement significatif des réseaux de transport et de distribution, dont les bénéfices liés au foisonnement des ressources énergétiques surpassent souvent ceux des solutions de stockage local. Les microgrids et le stockage local d'énergie doivent ainsi être envisagés comme des compléments aux infrastructures centrales, favorisant une approche mixte pour répondre aux défis de résilience et d'optimisation énergétique. Il est toutefois à noter que l'accroissement de l'autoconsommation, notamment par l'usage des smart grids, microgrids et STEP, s'accompagne également d'une perte de rendement des assets énergétiques, qui devra être prise en compte dans les stratégies d'optimisation.
- **Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)** : Les STEP jouent un rôle clé dans la gestion des fluctuations des énergies renouvelables en stockant l'énergie excédentaire produite par ces sources. Elles fonctionnent en pompant de l'eau vers des réservoirs en hauteur durant les périodes de faible demande, puis en libérant cette eau pour produire de l'électricité lors des pics de consommation. Bien que leur développement ne soit pas directement lié à l'adaptation au changement climatique, les STEP contribuent à la stabilité du système électrique et à l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique. En France, leur capacité de stockage, allant jusqu'à 100 GWh, représente un atout pour l'équilibrage des réseaux de transport.

- **Coordination intersectorielle** : Une coordination accrue entre les différents réseaux d'infrastructures (électricité, gaz, télécommunications, internet) est essentielle pour améliorer la résilience globale des infrastructures nationales et minimiser les interruptions de service, tout en assurant une réponse rapide lors des crises climatiques majeures. L'électricité, en particulier, joue un rôle central en tant que moyen de contrôle des flux énergétiques et de commodités, y compris ceux liés aux réseaux de gaz et à d'autres infrastructures critiques. Cette transversalité souligne l'importance d'investir dans des systèmes interconnectés, tels que les smart grids, capables d'optimiser les flux d'énergie et de renforcer la capacité des réseaux à faire face aux événements climatiques extrêmes.

3.2.3. ADAPTATION DES ENERGIES RENOUVELABLES

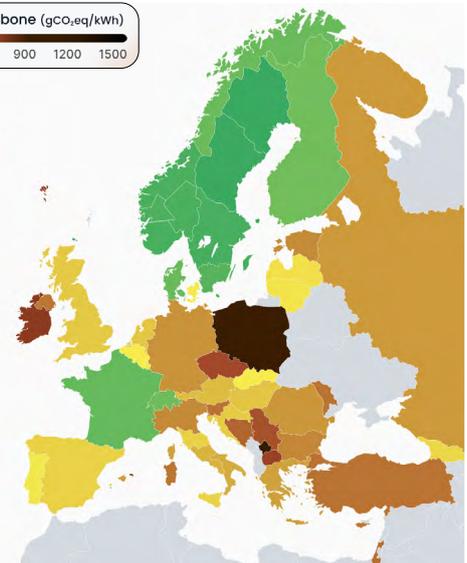
- **Hydroélectricité** : Le changement climatique modifie les régimes hydriques, affectant les débits des rivières et, par conséquent, la production d'hydroélectricité. Des solutions technologiques sont mises en œuvre pour anticiper les débits futurs et optimiser la gestion des barrages, afin de mieux équilibrer la production et la consommation d'électricité face aux variations saisonnières. Les STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage), qui recyclent l'eau entre deux réservoirs, jouent également un rôle clé en valorisant les barrages existants. Elles permettent de stocker l'énergie excédentaire produite à partir d'autres sources, comme l'éolien ou le solaire, et de la restituer lors des pics de consommation. Bien qu'elles ne soient pas directement affectées par les sécheresses prolongées comme les centrales en fil de l'eau, leur rendement d'environ 80 % implique qu'en l'absence d'apports gravitaires supplémentaires, elles consomment plus d'énergie qu'elles n'en produisent. L'optimisation de la gestion de l'eau dans ces systèmes et leur complémentarité avec les barrages sont essentielles pour garantir leur efficacité et leur contribution à la transition énergétique.
- **Énergie éolienne** : Les régimes de vent actuels, qui déterminent la localisation des éoliennes, sont pris en compte pour des horizons correspondant à la durée de vie des installations (environ 30 ans). Toutefois, l'évolution des régimes de vent à long terme, au-delà de cette période, reste incertaine. En termes d'adaptation, l'enjeu principal réside dans la résilience des éoliennes face à des conditions climatiques extrêmes, telles que des tempêtes ou des épisodes de vents exceptionnels, plutôt que dans la garantie d'une production stable malgré les changements climatiques. Par ailleurs, l'accroissement de l'autoconsommation, facilité par des technologies telles que les smart grids, microgrids et STEP, s'accompagne d'une perte de rendement des assets énergétiques. Ces défis opérationnels devront être pris en

compte pour optimiser l'intégration des énergies éoliennes tout en maintenant la robustesse et l'efficacité globale du système énergétique.

- **Énergie solaire** : L'efficacité des panneaux photovoltaïques est affectée par l'augmentation des températures et les variations dans la couverture nuageuse. Les événements climatiques extrêmes comme la grêle représentent également une menace importante pour les installations solaires, nécessitant une amélioration des modèles prédictifs locaux.
- **Production de gaz renouvelables** : Le changement climatique affecte également la production de gaz renouvelables issus de la méthanisation ou de la biomasse. En particulier, les modifications de l'ensoleillement, des précipitations, et de la température pourraient influencer la croissance des cultures servant à la production de biomasse. Des ajustements dans la rotation des cultures seront nécessaires pour optimiser cette production.
- **Systèmes de gestion intelligente de l'énergie** : Les systèmes de gestion intelligente de l'énergie jouent un rôle clé dans l'adaptation des réseaux énergétiques au développement des ENR et à l'intégration des nouveaux usages. Ces technologies permettent d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables, contribuant ainsi à la réduction des émissions de GES et au renforcement des flexibilités dans les systèmes électriques pour gérer la variabilité météo-climatique actuelle. En cas d'événements climatiques extrêmes, ces systèmes décentralisés facilitent une gestion proactive des coupures et une répartition efficace de la charge énergétique, améliorant ainsi la résilience des infrastructures face aux impacts du changement climatique. Cependant, bien que plus résilients grâce à leur capacité d'ilotage, les systèmes décentralisés présentent une fiabilité moindre par rapport aux systèmes centralisés (LOLE plus élevé). De plus, leur autoconsommation IT est significativement accrue, en raison d'un arbitrage plus complexe entre on-grid/off-grid, d'une coexistence AC/DC, et d'une gestion en



Source : Electricity Maps – Intensité carbone de la production d'électricité en Europe (données du 24 septembre 2024)



temps réel nécessitant davantage de ressources technologiques. Ces contraintes opérationnelles et énergétiques doivent être prises en compte pour maximiser les bénéfices tout en limitant les impacts sur l'efficacité globale des réseaux.

3.2.4. STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

Les technologies de stockage d'énergie sont des solutions d'avenir pour améliorer la flexibilité du réseau et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

- **Batteries de stockage** : Bien que les batteries stationnaires permettent de stocker l'électricité excédentaire produite par les parcs éoliens ou solaires durant les périodes de surproduction, leur rôle dans le contexte de l'adaptation au changement climatique réside principalement dans leur capacité à fonctionner dans des conditions extrêmes. Les enjeux techniques incluent notamment leur performance et leur durabilité face à des températures extérieures élevées, pouvant atteindre 50°C, ce qui nécessite le développement de technologies résilientes adaptées à ces nouvelles contraintes climatiques.
- **Stockage thermique** : Le stockage thermique permet de capturer et conserver l'excès de chaleur ou de froid produit par des sources renouvelables ou industrielles. Utilisé dans les réseaux de chaleur urbains ou pour des applications industrielles, il stocke l'énergie durant les périodes de faible demande et la restitue lors des pics de consommation.

3.2.5. ENJEUX ÉCONOMIQUES ET GOUVERNANCE

- **Coût des investissements** : Les investissements dans l'adaptation des infrastructures énergétiques sont essentiels pour limiter les coûts engendrés par les interruptions de service et les réparations suite aux catastrophes climatiques. Moderniser ces infrastructures et renforcer leur résilience climatique représente une stratégie clé pour prévenir des pertes économiques majeures à long terme. Le réseau électrique, en particulier, doit être adapté aux nouvelles conditions climatiques et à l'intégration croissante des énergies renouvelables. Dans cette perspective, RTE a annoncé un plan ambitieux d'investissement de 100 milliards d'euros d'ici 2040. Ce plan vise à moderniser le réseau, renforcer sa robustesse face aux aléas climatiques, et faciliter l'accélération de la transition énergétique en soutenant une gestion optimale des énergies renouvelables.
- **Gouvernance et coordination** : Une coordination étroite entre les acteurs du secteur énergétique (gestionnaires de réseaux, producteurs d'énergie, régulateurs, et gouvernements) est essentielle pour garantir que les stratégies d'adaptation sont mises en œuvre de manière efficace. Les partenariats entre les acteurs du secteur

énergétique et les laboratoires de recherche se multiplient, avec pour objectif de développer des solutions innovantes dans les domaines du stockage d'énergie, de la gestion des ressources hydriques et de la réduction de l'empreinte carbone.

- **Sécurisation des chaînes d'approvisionnement en matériaux critiques** : Il est crucial de surveiller les chaînes d'approvisionnement en matériaux critiques comme le cuivre, tout en encourageant l'utilisation de matériaux recyclés pour renforcer la résilience du réseau électrique. La gestion de ces chaînes repose de plus en plus sur des solutions technologiques avancées, telles que l'intégration de systèmes de traçabilité basés sur la blockchain. Bien que ces technologies améliorent la transparence et la confiance dans les flux de matériaux, elles entraînent également une augmentation des besoins en énergie et en infrastructures IT, soulignant l'importance d'équilibrer ces avancées avec des solutions énergétiques durables.

3.2.6. INNOVATION ET R&D

- **Recherche et développement** : L'innovation technologique est au cœur de l'adaptation du secteur énergétique. Les programmes de R&D se concentrent sur le développement de nouvelles technologies pour améliorer la résilience des infrastructures existantes et créer des solutions énergétiques de nouvelle génération capables de résister aux impacts climatiques futurs. Parmi les pistes de recherche prioritaires figurent, entre autres :
 - a. **Développement de batteries résilientes** : En plus d'augmenter leur capacité et leur durabilité pour le stockage à long terme de l'énergie renouvelable, il est crucial de s'assurer que ces technologies sont résistantes aux conditions climatiques extrêmes, telles que des températures élevées ou des variations rapides de température.
 - b. **Réseaux intelligents (smart grids) adaptés** : Bien que les smart grids soient essentiels pour la gestion en temps réel des flux d'énergie, leur résilience face aux impacts climatiques, comme les tempêtes ou les inondations, doit être renforcée pour garantir une continuité de service.
 - c. **Matériaux innovants pour les infrastructures** : L'intégration de matériaux plus résistants dans la construction des infrastructures énergétiques permettra de mieux répondre aux événements climatiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les tempêtes et les inondations.
 - d. **Réduction de la consommation d'eau dans les systèmes de refroidissement** : Les technologies de refroidissement à air ou hybrides offrent une alternative durable pour limiter les prélèvements en eau dans les centrales thermiques et nucléaires, un enjeu clé dans un contexte de raréfaction des ressources hydriques.

- Partenariats et collaborations : Les collaborations entre acteurs du secteur énergétique, start-ups, laboratoires de recherche et experts en climatologie sont essentielles pour accélérer l'adoption des technologies d'adaptation. Ces partenariats facilitent le partage des meilleures pratiques et contribuent à la mise en œuvre rapide des solutions innovantes à l'échelle nationale et internationale.

3.2.7. COMBUSTIBLES LIQUIDES ET BOIS-ÉNERGIE

- **Combustibles liquides et bois-énergie** : Bien que ce rapport se concentre principalement sur les réseaux d'électricité et de gaz, les combustibles liquides (comme le fioul) et le bois-énergie constituent également des sources d'énergie importantes en France, surtout dans les zones rurales. Leur rôle dans le mix énergétique est actuellement en déclin, mais ils restent indispensables pour de nombreuses applications domestiques et industrielles. Une évaluation approfondie de leur résilience face aux changements climatiques, en particulier en ce qui concerne l'approvisionnement et la régénération des ressources en bois, mériterait d'être menée dans le cadre de futures recherches.

Le secteur de l'énergie en France adopte une approche proactive pour s'adapter aux défis posés par le changement climatique. Grâce à une combinaison de modernisation des infrastructures, d'innovation technologique, et de coordination stratégique, les acteurs du secteur s'efforcent de garantir une production et une distribution d'énergie fiables et résilientes face aux impacts climatiques croissants. L'amélioration de la résilience des infrastructures, le développement des énergies renouvelables, et l'innovation dans les technologies de stockage d'énergie sont essentiels pour garantir un avenir énergétique durable. Les investissements en cours dans ces technologies d'adaptation sont essentiels pour préserver la sécurité énergétique du pays tout en minimisant les coûts économiques à long terme.

3.3. Agriculture

L'agriculture, en lien direct avec la sécurité alimentaire, est fortement impactée par les changements climatiques, en particulier dans la gestion des ressources en eau. Les changements dans les régimes de précipitations, l'augmentation des températures, la fréquence accrue des événements météorologiques extrêmes, tels que les sécheresses et les inondations, ainsi que la disponibilité réduite d'eau douce posent des défis considérables pour la productivité agricole. En France, environ 20 % des terres agricoles sont déjà affectées par la sécheresse, ce qui souligne l'urgence de développer des technologies et des stratégies d'adaptation pour

assurer la sécurité alimentaire et la durabilité des systèmes agricoles. Toutefois, les chaînes d'approvisionnement globales, notamment pour les produits d'élevage et les cultures stratégiques, amplifient les défis liés au changement climatique et nécessitent des approches coordonnées à l'échelle internationale. Ce chapitre aborde les enjeux climatiques de l'agriculture, ainsi que les technologies d'adaptation pour une gestion optimisée des ressources.

3.3.1. ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR L'AGRICULTURE

L'agriculture est l'un des secteurs les plus vulnérables aux effets du changement climatique. Voici les principaux impacts :

- **Stress hydrique croissant** : Les sécheresses plus fréquentes et intenses, dues aux variations des régimes de précipitation, augmentent la pression sur les ressources en eau.
- **Dégradation des sols** : Le manque d'eau exacerbe la dégradation des sols, entraînant une baisse de la fertilité et un risque accru d'érosion, compromettant la production agricole à long terme et rendant nécessaire le développement de pratiques de gestion durables.

3.3.2. SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES POUR L'ADAPTATION EN AGRICULTURE

3.3.2.1. Gestion optimisée de l'eau

La gestion de l'eau est cruciale pour l'adaptation de l'agriculture aux nouvelles conditions climatiques. L'irrigation est essentielle pour compenser les périodes de sécheresse, mais elle doit être optimisée pour éviter le gaspillage de l'eau. Des systèmes de gestion automatisée, utilisant des capteurs IoT, l'intelligence artificielle, et des images satellitaires, permettent de surveiller les niveaux d'humidité du sol et d'ajuster l'irrigation en temps réel.

- **Micro-irrigation** : Ce système utilise des tuyaux et des goutteurs pour délivrer de petites quantités d'eau directement à la racine des plantes, ce qui permet de réduire la consommation d'eau de 30 à 40 %, sans compromettre les rendements.
- **Réutilisation des eaux usées traitées** : La réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation est une solution prometteuse pour pallier les pénuries d'eau dans les zones agricoles. En France, environ 30 % des rivières sont alimentées par des eaux issues des stations d'épuration. Cependant, cette pratique doit être gérée avec soin pour éviter les conflits entre les différents usagers de l'eau et pour protéger les écosystèmes naturels. Une attention particulière doit être portée à la qualité de l'eau réutilisée pour prévenir toute contamination des cultures.
- **Capteurs et outils d'aide à la décision** : L'utilisation de capteurs d'humidité du sol couplée à des systèmes d'irrigation automatisés permet une

gestion précise de l'eau. Ces capteurs mesurent en temps réel les besoins en eau des cultures et ajustent l'irrigation en conséquence, évitant ainsi tout sur- ou sous-arrosage.

- **Irrigation raisonnée** : L'irrigation doit être utilisée de manière raisonnée pour éviter l'effet rebond, où une augmentation de la disponibilité en eau conduirait à une intensification non durable de la production agricole. L'objectif est de maintenir les niveaux de production actuels tout en minimisant la consommation d'eau, afin de préserver cette ressource précieuse dans un contexte de variabilité climatique accrue.

3.3.2.2. Sélection végétale, agroécologie et gestion des sols

La sélection de variétés végétales résistantes au stress hydrique est une solution d'adaptation essentielle :

- **Sélection variétale** : Le développement et la diffusion de variétés de cultures résistantes à la sécheresse, à la salinité, et à d'autres stress climatiques sont essentiels pour l'adaptation du secteur agricole. Les variétés à enracinement profond peuvent accéder à l'eau plus efficacement, réduisant ainsi leur dépendance aux précipitations régulières. La sélection variétale permet aux agriculteurs de maintenir des niveaux de production élevés malgré les conditions climatiques défavorables.
- **Agroécologie et agroforesterie** : L'agroécologie, qui repose sur la diversification des cultures et l'utilisation des processus naturels pour améliorer la résilience des systèmes agricoles, est une approche clé pour l'adaptation. Cette pratique réduit la vulnérabilité des cultures aux extrêmes climatiques et améliore la santé des sols, ce qui est crucial pour maintenir la productivité à long terme. L'agroforesterie, la combinaison de cultures agricoles avec des arbres, permettant de protéger les cultures contre les aléas climatiques, est également une solution durable. Ces pratiques permettent de diversifier les productions et d'améliorer la résilience des exploitations.
- **Agroéquipements intelligents** : Des robots arroseurs et des drones sont utilisés pour optimiser l'irrigation et surveiller la santé des cultures à grande échelle. Ces équipements permettent une gestion plus précise et plus efficace de l'eau et des intrants agricoles⁷.
- **Agrivoltaïsme** : L'installation de panneaux solaires au-dessus des cultures permet à la fois de générer de l'énergie et de protéger les cultures contre le rayonnement direct du soleil, réduisant ainsi les besoins en eau pour certaines cultures. Les projets de R&D sur le sujet, tels que ceux dé-

veloppés par l'INRAE, visent à combiner la production énergétique et la résilience des pratiques agricoles face au changement climatique.

- **Robotique** : La robotique, combinée aux technologies de précision telles que les capteurs IoT, offre des solutions prometteuses pour optimiser les pratiques agroécologiques dans un contexte climatique en mutation.

3.3.2.3. Gestion des micro-organismes et des sols

- **Gestion des micro-organismes** : La gestion des micro-organismes du sol est une approche prometteuse pour faire face aux défis environnementaux liés au changement climatique. En favorisant une occupation continue des sols grâce à des cultures combinées (intercropping et relay cropping), on maximise leur capacité à fournir des services écosystémiques et on stimule une biodiversité microbienne accrue. Cette approche permet également de maintenir les sols plus fertiles, en augmentant leur teneur en carbone et en réduisant les émissions de GES.
- **Rôle de l'élevage dans la gestion des sols** : L'élevage, en particulier le pâturage extensif, joue un rôle crucial dans la gestion des sols. Les animaux contribuent à enrichir le sol en matière organique via leurs déjections, ce qui améliore la structure et la fertilité du sol. Par ailleurs, les pratiques de pâturage bien gérées peuvent limiter l'érosion, augmenter la rétention d'eau et stimuler la biodiversité des écosystèmes prairiaux. Cependant, un surpâturage ou une mauvaise gestion peut entraîner une dégradation des sols, ce qui souligne l'importance d'un élevage durable et bien encadré.
- **Gestion des sols et lutte contre l'érosion** : La gestion des sols, notamment par le biais de techniques telles que le couvert végétal et le labour minimal, est essentielle pour prévenir l'érosion et maintenir la fertilité des sols. Par ailleurs, il est à noter que l'ajout de biochar dans les champs peut être néfaste à la croissance de beaucoup de plantations très peu racinaires, par exemple des grandes cultures comme le tournesol et le soja. Le biochar semblerait beaucoup moins efficace sur la croissance agricole que le glucose par exemple, qui lui, présente du carbone soluble. Ces pratiques contribuent à la rétention d'eau dans le sol, réduisant ainsi la dépendance à l'irrigation et augmentant la résilience des cultures face aux sécheresses.
- **Maintien de la couverture végétale des sols** : Il est essentiel de maintenir une couverture continue des sols pour renforcer leur résilience et protéger la biodiversité. Laisser des sols à nu, comme dans certaines grandes parcelles agricoles, peut créer un « désert biologique ». La chaleur du sol à nu accélère la respiration des micro-organismes, ce qui consomme rapidement la matière organique restante, menaçant ainsi la fertilité à long terme.

⁷ Ensemble des produits et ressources utilisés dans le processus de production agricole pour améliorer les rendements ou protéger les cultures.

- **Optimisation du stockage du carbone et de l'azote dans les sols :** La disponibilité en azote joue un rôle crucial en agriculture, et il est essentiel de préserver la teneur en carbone des sols. Le rapport C/N (carbone/azote) est un indicateur clé pour évaluer l'évolution de la matière organique dans les sols. Un rapport de 10 est souvent considéré comme stable. Malheureusement, en raison de pratiques agricoles inappropriées, le sol stocke trop peu de carbone, et il y a une émission excessive de N₂O (protoxyde d'azote), un puissant gaz à effet de serre. Il est donc essentiel d'adopter des pratiques agricoles qui favorisent une gestion équilibrée du carbone et de l'azote dans les sols.

3.3.3. TECHNOLOGIES DE SURVEILLANCE ET DE GESTION DES RISQUES

- **Modélisation climatique et prévisions agricoles :** L'utilisation de modèles climatiques avancés permet de prévoir les conditions météorologiques à court et long terme, aidant ainsi les agriculteurs à prendre des décisions éclairées sur la plantation, l'irrigation, et la gestion des cultures. Ces prévisions peuvent être utilisées pour optimiser les calendriers agricoles et pour adapter les pratiques en fonction des conditions climatiques prévues.
- **Outils de gestion des crises climatiques :** L'adaptation agricole nécessite également des systèmes d'alerte précoce et des outils de gestion des crises pour faire face aux événements climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les vagues de chaleur, et les inondations. Ces systèmes permettent de minimiser les pertes agricoles en fournissant des informations en temps réel et des conseils sur les mesures à prendre pour protéger les cultures.
- **Cultures associées pour une meilleure gestion des sols et des émissions de GES :** Les cultures associées, telles que l'intercropping et le relay cropping, sont des solutions accessibles et efficaces pour améliorer les pratiques agricoles. En associant plusieurs cultures sur une même parcelle, la biodiversité est augmentée, les émissions de GES réduites, et plus de carbone est séquestré dans les sols. Cette pratique permet aussi de garder les sols continuellement couverts, ce qui enrichit leur teneur en carbone tout en réduisant leur érosion.

3.3.4. RÉFORME DE LA CHAÎNE DE VALEUR AGRICOLE

Les enjeux climatiques et alimentaires nécessitent une approche globale, intégrant l'agriculture et les systèmes alimentaires.

- **Répartition spatiale des cultures :** Le changement climatique nécessite une réévaluation de la répartition spatiale des cultures en France. Cer-

taines régions, traditionnellement adaptées à certaines cultures, pourraient ne plus être viables en raison des nouvelles conditions climatiques. Il est donc essentiel de redéfinir les zones de production agricole en fonction des nouvelles réalités climatiques pour optimiser l'utilisation des ressources et maximiser les rendements.

- **Systèmes de production agroalimentaire :** Les systèmes d'agriculture industrielle et spécialisée sont particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique. La transition vers des systèmes de production plus résilients, basés sur la diversité des cultures et l'utilisation durable des ressources naturelles, est nécessaire pour assurer la sécurité alimentaire à long terme. Étant donné l'importance des importations pour l'élevage et l'alimentation humaine, des efforts accrus doivent être déployés pour sécuriser les chaînes d'approvisionnement globales face aux risques climatiques. La dépendance croissante à l'égard de marchés étrangers pourrait accentuer les vulnérabilités alimentaires en cas de perturbations climatiques majeures.

3.3.5. ENJEUX ECONOMIQUES ET SOCIAUX

- **Coût des investissements :** L'adaptation du secteur agricole au changement climatique nécessite des investissements substantiels dans les technologies et les infrastructures. Ces investissements, nécessaires pour moderniser les systèmes d'irrigation et adopter des pratiques agroécologiques, peuvent représenter une charge importante pour les petites exploitations agricoles. Néanmoins, ces coûts sont justifiés par les bénéfices à long terme en termes de sécurité alimentaire et de résilience économique. Les investissements dans l'irrigation intelligente et les systèmes de surveillance climatique peuvent, par exemple, réduire les pertes agricoles et stabiliser les revenus des agriculteurs malgré les conditions climatiques changeantes.
- **Impact sur les emplois agricoles :** La transition vers des pratiques agricoles plus résilientes pourrait également entraîner des changements dans la structure de l'emploi agricole. De nouvelles compétences seront nécessaires pour gérer les technologies avancées et pour adapter les pratiques agricoles aux nouvelles conditions climatiques. Cela nécessitera des programmes de formation et de reconversion professionnelle pour assurer que les travailleurs agricoles sont préparés aux défis de l'adaptation.
- **Gouvernance et coordination des acteurs :** Une coordination efficace entre les différents acteurs du secteur agricole, y compris les agriculteurs, les coopératives, les instituts de recherche, et les gouvernements, est essentielle pour réussir l'adaptation. Cela implique de développer des politiques agricoles qui soutiennent l'innovation et l'adoption de pratiques résilientes, ainsi que de garantir que les agriculteurs ont accès aux

ressources et aux informations nécessaires pour mettre en œuvre ces pratiques.

- **Soutien public et mutualisation :** Pour surmonter ces enjeux économiques, des mesures de soutien financier doivent être mises en place. La mutualisation des technologies et des équipements entre les exploitations agricoles est une solution en développement, permettant aux petites exploitations d'accéder à des outils technologiques avancés.
- **Rôle des politiques publiques :** Les politiques agricoles doivent intégrer les enjeux du changement climatique en promouvant des solutions durables et adaptées aux réalités locales. La collaboration entre les acteurs de la recherche, les filières agricoles et les autorités locales est cruciale pour assurer une transition efficace vers une agriculture plus résiliente.

L'adaptation de l'agriculture au changement climatique, notamment dans la gestion de l'eau, est un défi crucial pour les décennies à venir. Les technologies comme la micro-irrigation et les variétés résistantes au stress hydrique sont indispensables, mais il est également essentiel de revoir la gestion des parcelles. Plutôt que de laisser des parcelles homogènes, il est préférable d'encourager des pratiques comme l'intercropping, qui associe différentes cultures sur une même parcelle. Cela permet d'augmenter la biodiversité, de renforcer la résilience des sols et de réduire les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à un avenir agricole plus durable. Par ailleurs, l'amélioration des pratiques agricoles, accompagnée d'une réorganisation stratégique de la chaîne de valeur, est essentielle. L'avenir de l'agriculture en France dépendra de la capacité du secteur à intégrer ces innovations technologiques tout en respectant les impératifs écologiques.

3.4. Villes et bâtiments

La ville et le bâtiment sont au cœur des enjeux d'adaptation au changement climatique. Les villes, où se concentre plus de la moitié de la population mondiale, sont particulièrement exposées aux risques climatiques et font face à des défis importants : gestion de la chaleur, réduction des risques d'inondation, élévation du niveau de la mer, et optimisation des ressources. Les infrastructures urbaines et les bâtiments doivent être adaptés pour résister aux changements climatiques à venir, tout en intégrant des solutions durables pour protéger les populations et l'environnement. En France, la majeure partie des dépenses liées à l'adaptation concerne les infrastructures. Bien que celles-ci soient en bon état à l'échelle nationale, il est crucial de poursuivre les efforts pour garantir leur résilience face aux futures crises climatiques. Ce chapitre explore les enjeux et les solutions technologiques pour renforcer la résilience du secteur du bâtiment face aux défis du changement climatique. Par ailleurs, l'organisation

urbaine, notamment l'éclatement des zones périurbaines et l'étalement urbain, exacerbe les vulnérabilités face aux impacts du changement climatique. Une urbanisation diffuse entraîne une augmentation des distances parcourues, une dépendance accrue aux véhicules individuels, et une hausse des besoins en infrastructures, ce qui alourdit l'empreinte énergétique et les coûts d'adaptation. Une planification urbaine plus dense et mieux intégrée est donc indispensable pour réduire ces vulnérabilités et renforcer la résilience des villes.

3.4.1. ENJEUX CLIMATIQUES POUR LA VILLE ET LE BÂTIMENT

Les effets du changement climatique sur les villes et les bâtiments se manifestent de diverses manières, notamment :

- **Îlots de chaleur urbains :** Avec l'augmentation des températures et l'urbanisation non contrôlée, les zones urbaines sont particulièrement vulnérables à la formation d'îlots de chaleur, où la chaleur est piégée par les surfaces imperméables comme le béton et l'asphalte. Les villes peuvent connaître des écarts de température atteignant jusqu'à 10°C de plus que les zones rurales environnantes.
- **Inondations urbaines :** L'urbanisation rapide, combinée à des systèmes de drainage souvent sous-dimensionnés, expose les villes à des inondations plus fréquentes et plus intenses, causées par des pluies soudaines et importantes. Les villes côtières sont particulièrement vulnérables à la montée des eaux et aux tempêtes.
- **Gestion des ressources en eau :** L'accès à l'eau potable et la gestion des eaux pluviales sont des enjeux majeurs. Les sécheresses prolongées peuvent affecter l'approvisionnement en eau des villes, tandis que les fortes pluies entraînent des risques accrus d'inondation.
- **Retrait-gonflement des argiles (RGA) :** Le phénomène de retrait-gonflement des argiles, provoqué par des variations d'humidité dans les sols, représente un enjeu majeur pour les bâtiments et infrastructures, particulièrement dans les régions aux sols argileux. Ce risque, désormais intégré dans le régime Cat-Nat grâce aux efforts des assureurs et au rapport Langrenoy, illustre son importance croissante dans les discussions sur l'adaptation au changement climatique. Les rapports de la Cour des comptes et des inspections interministérielles ont également mis en lumière l'ampleur et les implications économiques de ce problème. Outre les défis techniques liés à la détection, la prévention et la réparation des fissurations, le retrait-gonflement des argiles pose un problème significatif pour le secteur de l'assurance. Ce dernier est confronté à une augmentation des indemnités, ce qui soulève des questions sur la soutenabilité financière et les modalités de couverture de ces risques. La création d'un observatoire des risques climatiques par les

assureurs représente une avancée majeure pour mieux suivre ces phénomènes et adapter les stratégies d'assurance. Enfin, les recherches technologiques devront accorder une priorité aux outils de suivi en temps réel, aux méthodes de réparation innovantes, et aux approches préventives, comme l'amélioration des études de sol et le développement de matériaux résilients. Ces initiatives seront essentielles pour réduire les coûts, limiter les impacts sur les infrastructures et garantir la stabilité du système assurantiel face aux défis croissants liés au RGA.

3.4.2. SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES D'ADAPTATION

3.4.2.1. Gestion des eaux pluviales et adaptation des infrastructures

- **Infrastructures de gestion des eaux pluviales :** Les villes sont particulièrement vulnérables aux inondations causées par des précipitations extrêmes. Pour répondre à ce défi, des infrastructures de gestion des eaux pluviales, telles que des bassins de rétention, des systèmes d'infiltration, et des réseaux de drainage améliorés, sont développées pour absorber et détourner les excès d'eau. Ces infrastructures doivent être dimensionnées en tenant compte des projections climatiques futures, afin de garantir leur efficacité à long terme.
- **Systèmes de drainage urbain durables (SUDS) :** Ces systèmes incluent des infrastructures telles que des bassins de rétention, des zones inondables planifiées, et des tranchées drainantes, destinées à absorber et à retenir l'eau de pluie, empêchant ainsi les inondations soudaines. Les SUDS permettent aussi de recharger les nappes phréatiques en eau.
- **Infrastructures perméables :** L'utilisation de matériaux perméables pour les trottoirs, parkings et routes permet une infiltration directe des eaux pluviales dans le sol. Cela réduit la quantité d'eau qui doit être évacuée par les systèmes de drainage, limitant ainsi les risques d'inondations.
- **Systèmes d'alerte et de gestion de crise :** Des systèmes d'alerte précoce et des plans de gestion de crise sont essentiels pour anticiper et réagir rapidement aux risques d'inondation. Ces systèmes utilisent des données en temps réel sur les précipitations et les niveaux des cours d'eau pour déclencher des alertes et mettre en œuvre des mesures d'urgence, réduisant ainsi les impacts des inondations sur les populations urbaines.

3.4.2.2. Adaptation des bâtiments face à la chaleur au aux sécheresses

- **Thermorésilience et isolation :** La thermorésilience des bâtiments et la compréhension appro-

fondie de la science des matériaux actuels sont des éléments clés pour améliorer la résistance des constructions face aux vagues de chaleur et aux phénomènes climatiques extrêmes. Deux caractéristiques essentielles à considérer dans ce contexte sont l'inertie thermique (capacité calorifique des matériaux) et la conduction thermique. Ces propriétés influencent la capacité des matériaux à stocker et à restituer la chaleur, permettant ainsi un stockage naturel efficace. Les matériaux à forte inertie thermique, tels que le béton, la pierre ou les briques, offrent des avantages significatifs dans la régulation des températures intérieures. L'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments est essentielle pour réduire la consommation d'énergie nécessaire au chauffage en hiver et à la climatisation en été. Il est crucial d'adapter les choix de matériaux en fonction de ces caractéristiques pour maximiser la thermorésilience dans un contexte de changements climatiques. Cependant, il convient de noter que de nombreux matériaux actuels, tels que ceux contenant du clinker⁸, sont doublement émissifs : d'une part par la conversion du clinker en chaux, et d'autre part par l'énergie nécessaire à leur production, souvent issue de sources non électrifiées. L'utilisation de matériaux à forte inertie thermique, capables d'emmagasiner la chaleur et de la relâcher lentement (comme le béton, la pierre ou les briques), permet de limiter l'accumulation de chaleur dans les bâtiments durant la journée. Il est essentiel de ne pas se focaliser uniquement sur les stratégies visant à protéger du froid, mais de prendre en compte également l'importance croissante des périodes de chaleur intense. L'utilisation de ces matériaux permet d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, réduisant ainsi leur empreinte carbone tout en augmentant leur résilience face aux conditions climatiques extrêmes. Par ailleurs, les matériaux biosourcés ou recyclés offrent des solutions à faible impact carbone, tout en étant adaptés aux conditions climatiques changeantes.

- **Climatisation et systèmes de ventilation avancés :** Dans un contexte de vagues de chaleur de plus en plus fréquentes, l'installation de systèmes de climatisation efficaces devient une nécessité pour protéger la santé des populations. Cependant, il est crucial que ces systèmes soient conçus pour minimiser leur consommation énergétique. La maîtrise de la ventilation est essentielle pour garantir une adéquation entre la performance énergétique et la qualité de l'air dans les bâtiments face aux températures extrêmes. Des solutions innovantes, telles que les systèmes de ventilation naturels et les pompes à chaleur, sont explorées pour offrir une alternative durable à la climatisation traditionnelle. La ventilation naturelle et les brise-soleil permettent également de refroidir les bâtiments sans utiliser de systèmes de climatisation énergivores.

⁸ Constituant du ciment résultant de la cuisson à très haute température d'un mélange de 80% de calcaire et de 20% d'aluminosilicates.

- **Végétalisation urbaine** : La végétalisation urbaine, au travers de la plantation d'arbres et la création d'espaces verts, joue un rôle clé dans la réduction de la température en milieu urbain, en particulier lorsqu'elle est combinée à des pratiques d'isolation adaptées, réduisant ainsi les besoins en climatisation. Les arbres fournissent de l'ombre, réduisent l'évaporation et augmentent la biodiversité. Certaines villes ont mis en place des plans ambitieux pour verdifier jusqu'à 30 % de leur surface urbaine.
- **Approche intégrée basée sur les sciences liés au bâtiment (physique du bâtiment, matériaux et géologie)** : Plusieurs experts ont souligné que dans le secteur de la construction, il manque une sorte de «science globalisée du bâtiment» qui permettrait d'agir de manière holistique, sans nuire à l'ensemble du système. Encore plus que le développement de nouveaux matériaux, la solution démarre par une meilleure utilisation des matériaux existants, en tenant compte de leurs propriétés et de leur comportement dans différentes conditions climatiques, tant chaudes que froides. Les efforts d'adaptation et d'atténuation nécessitent également de grandes quantités de matériaux, ce qui souligne l'importance d'une reconception des infrastructures pour minimiser leur impact environnemental et favoriser le recyclage des matériaux utilisés. Cette approche scientifique intégrée, pourrait améliorer considérablement l'efficacité des solutions d'adaptation. L'IMT développe également des recherches sur les nouvelles propriétés des matériaux, telles que leur auto-réparabilité et leur durabilité accrue, pour augmenter leur cycle de vie et réduire les déchets.

3.4.2.3. Solution pour la gestion des risques et inondations

- **Digues et protections côtières** : Pour protéger les villes côtières de la montée du niveau de la mer et des tempêtes, des digues, des barrières anti-inondation et des solutions naturelles comme les mangroves et les marais côtiers sont mises en place.
- **Réseaux intelligents pour la gestion des infrastructures** : Les smart cities (ou villes intelligentes) développent des réseaux intelligents capables de monitorer les flux d'eau et d'énergie en temps réel, facilitant ainsi une réponse rapide et efficace lors d'inondations ou de pénuries.

3.4.3. VILLE RÉSILIENTE ET PLANIFICATION DURABLE

- **Développement de zones urbaines résilientes** : Le développement urbain doit intégrer des principes de résilience pour minimiser les risques climatiques. Cela inclut la planification de nouvelles zones urbaines dans des régions moins vulnérables aux inondations, la création de corridors écologiques pour améliorer la résilience des éco-

systèmes urbains, et l'intégration de solutions basées sur la nature pour renforcer la capacité des villes à absorber les chocs climatiques. Cela inclut également la densification intelligente des espaces urbains pour limiter les déplacements motorisés, réduire l'empreinte énergétique et optimiser les infrastructures existantes.

- **Révision des réglementations et normes de construction** : Il est nécessaire de revoir les réglementations et les normes de construction pour les adapter aux nouvelles réalités climatiques. Cela inclut des exigences plus strictes en matière de résilience aux inondations, de résistance aux vents extrêmes, et de gestion de la chaleur urbaine. Ces normes doivent également encourager l'utilisation de matériaux durables et de techniques de construction qui réduisent l'empreinte environnementale des bâtiments tout en améliorant leur durabilité face aux changements climatiques.
- **Rénovation des infrastructures existantes** : La rénovation des infrastructures urbaines existantes est une priorité pour améliorer leur résilience face aux impacts climatiques. Cela inclut le renforcement des bâtiments anciens pour résister aux tempêtes et aux inondations, la modernisation des systèmes de drainage pour prévenir les inondations urbaines, et l'amélioration de l'accessibilité aux espaces verts pour atténuer les effets des îlots de chaleur.
- **Réduction de l'éclatement urbain** : L'éclatement des villes en périphérie, souvent lié à une urbanisation non contrôlée, augmente les vulnérabilités climatiques et la consommation énergétique. Une meilleure organisation urbaine, favorisant la proximité des services et des infrastructures dans les zones habitées, est essentielle pour limiter ces impacts.

3.4.4. TECHNOLOGIES ET INNOVATIONS POUR LA MOBILITÉ URBAINE

- **Transport urbain résilient** : L'adaptation des infrastructures de transport aux impacts du changement climatique est cruciale pour maintenir la mobilité urbaine. Cela comprend le renforcement des infrastructures ferroviaires et routières pour résister aux températures extrêmes et aux inondations, ainsi que le développement de solutions de mobilité durable, telles que les transports publics électrifiés et les réseaux de pistes cyclables, qui réduisent la dépendance aux combustibles fossiles et améliorent la résilience des villes.
- **Adaptation pour la mobilité douce** : Le développement de la mobilité douce, comme la marche et le vélo, nécessite une adaptation des infrastructures urbaines pour faire face aux impacts du changement climatique. Les itinéraires dédiés devraient inclure des aménagements tels que des zones ombragées, des plantations d'arbres, ou des parcours proches de cours d'eau, afin d'atténuer les effets des vagues de

chaleur et de rendre ces modes de transport plus attractifs même dans des conditions climatiques extrêmes. Ces initiatives, en plus de réduire la distance moyenne parcourue par les habitants grâce à une urbanisation plus dense et mixte, contribueront à renforcer la résilience des villes tout en encourageant des alternatives durables au transport motorisé.

3.4.5. ENJEUX SOCIAUX ET GOUVERNANCE

- **Protection des populations vulnérables :** Les populations les plus vulnérables, telles que les personnes âgées, les enfants, et les personnes à mobilité réduite, sont les plus exposées aux risques climatiques en milieu urbain. Les politiques d'urbanisme doivent inclure des mesures spécifiques pour protéger ces groupes, notamment par l'amélioration de l'accessibilité aux services essentiels, la création de refuges climatisés, et la mise en place de programmes de sensibilisation pour préparer les communautés aux risques climatiques.
- **Gouvernance urbaine et coordination intersectorielle :** L'adaptation urbaine nécessite une gouvernance efficace et une coordination entre les différents niveaux de gouvernement, les secteurs public et privé, et la société civile. Les efforts d'adaptation urbains sont encore fragmentés et manquent d'une gouvernance efficace. Cela inclut la mise en place de structures de gouvernance capables de gérer les défis complexes liés à l'adaptation, d'assurer une planification urbaine cohérente, et de mobiliser les ressources nécessaires pour mettre en œuvre les solutions d'adaptation identifiées.

L'adaptation de la ville et du bâtiment est indispensable pour garantir la résilience des villes face aux impacts du changement climatique. Les solutions technologiques, telles que la gestion durable des eaux pluviales, les toitures végétalisées, et l'utilisation de matériaux à forte inertie thermique, sont des réponses concrètes aux défis liés à la chaleur, aux inondations et à la disponibilité de l'eau. Ces technologies, combinées à une gouvernance efficace et des investissements conséquents, permettront aux villes de mieux gérer les impacts du changement climatique et d'assurer des environnements urbains résilients capables de protéger les populations et de préserver la qualité de vie malgré les défis posés par les conditions climatiques futures.

3.5. Industrie

Le secteur industriel est particulièrement exposé aux conséquences du changement climatique, en raison de sa dépendance à des ressources naturelles comme l'eau et l'énergie, et de la vulnérabilité de ses infrastructures. Les phénomènes climatiques ex-

trêmes, tels que les vagues de chaleur, les tempêtes, et les sécheresses, perturbent directement la production industrielle, augmentent les coûts de maintenance et affectent la compétitivité des entreprises.

3.5.1. ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LE SECTEUR INDUSTRIEL

Les événements climatiques extrêmes ont des impacts significatifs sur le secteur industriel, allant de l'interruption des chaînes d'approvisionnement, à la dégradation des infrastructures, et à l'augmentation des coûts de production. Ces perturbations compromettent la continuité des opérations industrielles, provoquent des retards dans la livraison des produits, et affectent la compétitivité des entreprises sur les marchés nationaux et internationaux.

- **Consommation d'eau et stress hydrique :** L'industrie utilise d'importantes quantités d'eau pour le refroidissement, en particulier dans les centrales thermiques et nucléaires. Face à l'augmentation des vagues de chaleur et à la diminution des précipitations, la disponibilité de l'eau devient une préoccupation majeure. Le stress hydrique affecte la capacité de production, notamment dans les secteurs à forte consommation d'eau, comme la chimie et l'agroalimentaire.
- **Vulnérabilité des infrastructures :** Les infrastructures industrielles, souvent situées dans des zones côtières ou vulnérables aux inondations, sont confrontées à des risques accrus. Les tempêtes et les inondations endommagent les installations, ce qui perturbe les opérations et entraîne des coûts de réparation importants. Les événements climatiques extrêmes peuvent aussi interrompre l'approvisionnement en matières premières et en énergie, ce qui a des répercussions sur les chaînes de production.
- **Dépendance énergétique :** L'industrie est fortement dépendante des réseaux énergétiques pour assurer une production continue. Les événements climatiques perturbent ces réseaux, provoquant des coupures d'électricité qui affectent les chaînes de production. L'intégration d'énergies renouvelables et de systèmes de stockage peut contribuer à renforcer la résilience énergétique, bien que leur capacité à pallier les interruptions de manière fiable reste à évaluer.
- **Décarbonation des processus industriels :** L'industrie doit également relever le défi de la décarbonation pour répondre aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Cela implique l'adoption de technologies plus sobres en carbone et la modernisation des infrastructures pour réduire l'empreinte carbone du secteur. Cependant, il convient de noter que les processus industriels sont soumis à des pertes intrinsèques de rendement dues aux limitations de la thermodynamique. Ces pertes de rendement, exacerbées par les adaptations nécessaires pour gérer les impacts climatiques et réduire les émis-

sions, peuvent affecter la rentabilité des investissements industriels.

3.5.2. TECHNOLOGIES CLÉS POUR L'ADAPTATION DU SECTEUR INDUSTRIEL

L'adaptation du secteur industriel au changement climatique repose sur l'adoption de technologies résilientes, la modernisation des infrastructures et une meilleure gestion des ressources naturelles. Les innovations dans les systèmes de refroidissement, la réutilisation des eaux usées, et la surveillance en temps réel des infrastructures permettent de renforcer la résilience du secteur face aux aléas climatiques.

- **Systèmes de refroidissement avancés** : Les systèmes de refroidissement en circuit fermé représentent une priorité technologique majeure, permettant de réduire considérablement les prélèvements sur les ressources naturelles en recyclant l'eau utilisée. Les systèmes de refroidissement à base d'air permettent de réduire la consommation d'eau dans les processus industriels. Certaines industries développent des systèmes de refroidissement sec pour limiter leur dépendance à l'eau en période de sécheresse, particulièrement dans des conditions climatiques extrêmes.
- **Réutilisation des eaux usées industrielles** : La réutilisation des eaux usées traitées est une solution importante pour limiter la consommation d'eau dans les secteurs industriels. Des systèmes innovants de traitement des eaux sont déployés, notamment dans l'industrie chimique, permettant une meilleure gestion des ressources hydriques.
- **Capteurs connectés et gestion prédictive des infrastructures** : L'utilisation de capteurs IoT dans les infrastructures permet une surveillance en temps réel des installations, anticipant ainsi les défaillances dues aux événements climatiques extrêmes. Ces systèmes de gestion intelligente garantissent une maintenance préventive et réduisent les temps d'arrêt, même en cas de conditions climatiques difficiles.
- **Optimisation de la chaîne d'approvisionnement** : L'adaptation des chaînes d'approvisionnement repose sur l'utilisation de modèles de simulation météorologique, permettant d'anticiper les impacts des aléas climatiques à court et moyen termes et d'ajuster les stratégies d'approvisionnement en conséquence. Cela contribue à assurer la continuité des flux de matières premières critiques, notamment pour les secteurs dépendant des transports internationaux et des ports.
- **Solutions énergétiques résilientes** : Pour faire face aux coupures d'électricité susceptibles d'être amplifiées par les événements climatiques, les industries s'appuient généralement sur des solutions de back-up comme les groupes électrogènes diesel. Par ailleurs, des investissements dans des solutions de stockage d'énergie, telles que les batteries de grande capacité, sont en

cours pour réduire l'empreinte carbone de ces systèmes, bien que cela relève davantage d'une logique de mitigation que d'adaptation.

- **Matériaux résilients et recyclables** : L'industrie s'adapte aux conditions climatiques en adoptant des matériaux résistants aux températures extrêmes et aux phénomènes d'érosion. Ces matériaux améliorent la durabilité des infrastructures et réduisent les besoins en maintenance à long terme. Une part de l'activité industrielle future sera de fournir des matériaux et produits recyclables aux autres secteurs.
- **Isolation thermique avancée** : L'utilisation de matériaux d'isolation innovants permet de mieux réguler la température dans les usines, réduisant ainsi les besoins en climatisation et en chauffage. Cette mesure contribue à limiter la consommation d'énergie et à améliorer la résilience des installations face aux vagues de chaleur de plus en plus fréquentes.
- **Solutions organisationnelles et procédurales** : Outre les innovations technologiques, des approches organisationnelles peuvent renforcer la résilience des infrastructures industrielles face aux conditions climatiques extrêmes. Cela inclut l'ajustement des horaires de travail pour limiter l'exposition des travailleurs et des équipements aux périodes les plus chaudes, ainsi que l'adaptation des procédés industriels pour réduire leur sensibilité aux variations de température. Ces mesures «soft» peuvent être mises en œuvre rapidement et à moindre coût, tout en complétant les efforts technologiques.

3.6. Transports

Les transports représentent un des secteurs économiques majeurs en France, mais ils sont également particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique. Les événements extrêmes tels que les vagues de chaleur, les inondations et les tempêtes perturbent non seulement les infrastructures, mais également les services de transport, augmentant les coûts de maintenance et de réparation, et affectant la continuité des déplacements de personnes et de marchandises. La cartographie précise des risques climatiques pour les infrastructures et les services de transport permettra de mieux anticiper et gérer les vulnérabilités dans ce secteur critique. Par ailleurs, de nouveaux besoins émergent face à ces enjeux climatiques, nécessitant une réponse proactive de l'industrie. Cela inclut le développement de matériaux innovants, tels que des verres capables de conserver la fraîcheur ou des revêtements réfléchissants, adaptés pour améliorer la résilience thermique des infrastructures et des équipements. Ces innovations permettront de répondre aux exigences croissantes en matière de durabilité et d'adaptation aux conditions climatiques futures. Le report modal, favorisant les transports moins polluants tels que le train, au détriment de l'avion et de la voiture, est également une

voie essentielle pour réduire les impacts climatiques et améliorer la résilience du secteur. Ce chapitre met en lumière les principaux enjeux auxquels le secteur des transports est confronté, ainsi que les solutions d'adaptation mises en œuvre pour renforcer sa résilience face aux aléas climatiques.

3.6.1. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE SECTEUR DES TRANSPORTS

Les infrastructures de transport, qu'elles soient routières, ferroviaires, portuaires ou aéroportuaires, subissent des dégradations importantes en raison de la multiplication des événements climatiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les inondations ou les tempêtes. Ces impacts affectent non seulement les coûts de maintenance et de réparation, qui augmentent significativement, mais également la continuité des services de transport de voyageurs et de marchandises. En conséquence, les retards et interruptions dans le transport ont des répercussions directes sur l'économie.

- **Vagues de chaleur et dilatation des infrastructures** : Les températures extrêmes provoquent la dilatation des rails et des caténaires, ce qui peut augmenter les risques de déraillement et nécessiter de réduire la vitesse des trains, entraînant une dégradation de la qualité du service de transport. De fortes amplitudes thermiques peuvent également avoir un impact sur les chaussées, affectant leur durabilité et leur usage. En 2022, par exemple, les vagues de chaleur ont entraîné des ralentissements ferroviaires importants, perturbant le réseau de transport et les déplacements des usagers.
- **Inondations et tempêtes** : Les inondations, qu'elles soient causées par ruissellement, remontée de nappes ou débordement de cours d'eau lors de crues torrentielles, endommagent gravement les infrastructures de transport. Ces événements peuvent entraîner des fermetures prolongées de routes, de tunnels et de ponts, comme cela a été observé lors de la tempête Alex en 2020. Ces perturbations affectent directement la mobilité des personnes et des marchandises, avec des conséquences significatives sur la continuité des services de transport.
- **Éboulements et glissements de terrain** : Les infrastructures de transport, en particulier dans les régions montagneuses, sont exposées aux éboulements et aux glissements de terrain, en particulier après des précipitations excessives. Ces phénomènes peuvent bloquer les routes et les voies ferrées, entraînant des retards significatifs et des interruptions prolongées des services de transport.
- **Aviation et transport maritime** : Le transport aérien et maritime, bien qu'abordés de manière périphérique, représentent près de 10 % de l'énergie primaire mondiale et sont presque totalement fossiles. Ces secteurs doivent envisager

des adaptations spécifiques : le transport aérien pourrait être contraint d'éviter les zones humides pour réduire l'effet de serre induit par les traînées de condensation, tandis que le transport maritime pourrait explorer de nouvelles routes, comme la route du Nord, à mesure que l'Arctique devient navigable. L'adoption de nouvelles propulsions, telles que les carburants d'aviation durables (SAF) ou même l'énergie nucléaire pour les grands navires, est une priorité technologique pour ces industries.

3.6.2. TECHNOLOGIES CLÉS POUR L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT

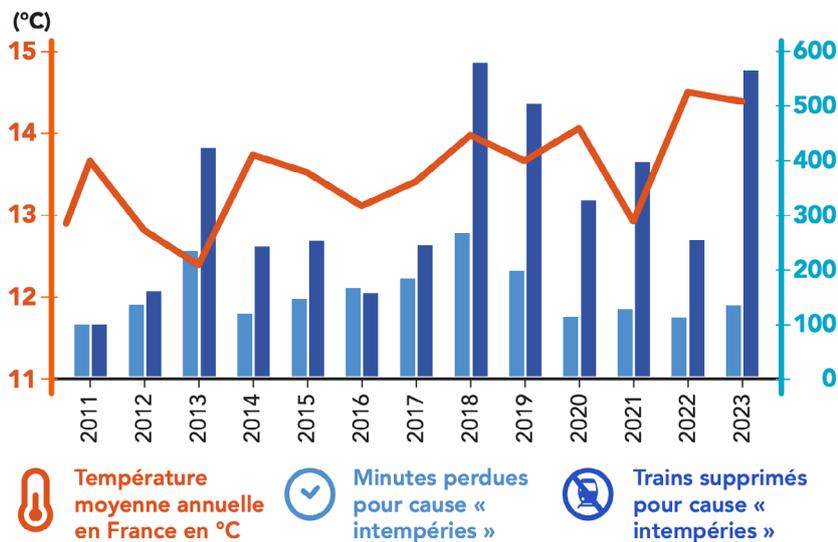
- **Modélisation d'aléas et de vulnérabilités** : Les analyses de risques permettent de détecter les vulnérabilités climatiques à long terme et d'orienter et prioriser les actions.
- **Systèmes d'alerte précoce et de gestion météorologique** : L'utilisation de systèmes d'alerte météorologique avancés permet d'anticiper les phénomènes climatiques extrêmes et d'informer rapidement les autorités et les opérateurs de transport pour sécuriser les infrastructures et prévenir les accidents.
- **Capteurs connectés pour la surveillance des infrastructures** : Les capteurs IoT installés sur les infrastructures de transport, telles que les voies ferrées et les routes, permettent de surveiller en temps réel des paramètres critiques, comme la température des rails, les fissures dans les chaussées, et les signes avant-coureurs d'éboulements. Ces systèmes de surveillance contribuent à anticiper les interventions nécessaires et à minimiser les interruptions de service.
- **Transport public résilient** : Les services de transport collectif doivent être adaptés au changement climatique afin de garantir leur bon fonctionnement et d'assurer le confort des passagers, même lors d'événements climatiques extrêmes. En particulier, l'adaptation du matériel roulant aux fortes chaleurs et aux infiltrations d'eau causées par des pluies intenses est cruciale. Cela inclut des mesures telles que l'amélioration des systèmes de climatisation, l'utilisation de matériaux résilients et le renforcement de l'étanchéité des véhicules. Un groupe de travail a été mis en place par la DGITM, réunissant des autorités organisatrices de la mobilité, des entreprises de transport de voyageurs et des fédérations, afin de favoriser l'échange de bonnes pratiques sur le confort thermique dans le matériel roulant. Ces efforts visent à garantir des services fiables et agréables pour les usagers, même face à des conditions climatiques extrêmes.
- **Renforcement des infrastructures de transport** : Les infrastructures de transport, qu'il s'agisse des ponts, tunnels, routes ou voies ferrées, doivent être renforcées pour faire face aux aléas climatiques de plus en plus fréquents et in-

tenses, tels que les inondations, les tempêtes et les éboulements. La modernisation des systèmes de drainage est essentielle pour prévenir l'accumulation d'eau sur les routes et les voies ferrées, garantissant ainsi la sécurité des usagers tout en minimisant les interruptions de service. Dans les zones particulièrement exposées, des systèmes de drainage performants permettent d'évacuer rapidement les eaux pluviales. L'État et le Cere-ma se sont déjà saisis de cette problématique au niveau routier, avec un guide technique d'assainissement en cours de mise à jour, élaboré dans le cadre d'un groupe de travail réunissant des experts techniques publics et privés. Cette démarche vise à intégrer les enjeux du changement climatique dans la conception et la maintenance des systèmes d'assainissement. Par ailleurs, l'évolution des référentiels techniques de conception, d'exploitation et de maintenance des infrastructures, engagée par l'État, les gestionnaires d'infrastructures et des organismes tels que le Cere-ma, constitue une réponse clé à ces défis. La mise à jour des référentiels techniques nationaux pour prendre en compte les impacts du changement climatique pourrait également impulser une harmonisation des normes au niveau européen et international, comme les normes CEN et ISO, favorisant une adaptation globale. En complément, des systèmes d'alerte précoces jouent un rôle crucial pour anticiper les risques climatiques, notamment en cas d'inondations, de tempêtes ou de vagues de chaleur, permettant ainsi de réduire les perturbations et d'améliorer la sécurité des usagers. De plus, l'utilisation de matériaux innovants et résistants aux températures extrêmes est une priorité pour renforcer la durabilité des infrastructures. Cela inclut le développement de revêtements routiers capables de supporter des températures élevées sans se déformer, ainsi que l'utilisation d'alliages métalliques plus performants pour les rails et les caténaires, afin de mieux résister aux phénomènes de dilatation thermique. Enfin, l'adaptation du matériel roulant aux conditions climatiques extrêmes est essentielle. Cela inclut l'installation de systèmes de refroidissement avancés pour éviter la surchauffe des véhicules, garantissant ainsi un service de transport fiable et confortable, même en cas de vagues de chaleur intenses. Ces efforts combinés permettront d'améliorer significativement la résilience et la durabilité des infrastructures et des services de transport face aux impacts croissants du changement climatique.

- **Adaptation des modes de propulsion :** Dans l'aviation, le développement de carburants alternatifs comme les SAF (Sustainable Aviation Fuels) est une priorité. En transport maritime, la recherche sur des propulsions nucléaires ou des systèmes hybrides, combinés à des innovations dans la conception des coques pour réduire la traînée, est essentielle pour s'adapter aux exigences climatiques et réglementaires futures.
- **Infrastructure de recharge résilientes :** Le développement de la mobilité électrique nécessite des

infrastructures de recharge robustes, capables de résister aux aléas climatiques extrêmes, tels que les tempêtes, les vagues de chaleur ou les fortes précipitations. Ces infrastructures doivent garantir la continuité des services même en cas de perturbations climatiques. Les stations de recharge doivent être conçues pour prévenir non seulement les inondations et les pannes de courant, mais également les risques de surchauffe pouvant affecter leur bon fonctionnement. De plus, les véhicules électriques doivent intégrer des technologies avancées de gestion thermique pour éviter la surchauffe des batteries lors de conditions extrêmes. Cependant, l'adaptation au changement climatique des infrastructures de recharge pourra intervenir à moyen terme, étant donné leur durée de vie moyenne estimée à 10-15 ans. Cette perspective offre une opportunité de planification progressive pour intégrer des solutions résilientes lors des cycles de renouvellement des infrastructures.

- **Systèmes de gestion des flux et réseaux de transport intelligents :** Les réseaux intelligents (smart grids) permettent d'améliorer la résilience des infrastructures de transport en optimisant la gestion des flux en temps réel. Ces technologies permettent aux opérateurs de rediriger les flux de transport, d'ajuster les horaires des trains et des bus, ou encore de fermer temporairement des portions de route ou de rail en fonction des conditions climatiques, minimisant ainsi les perturbations pour les usagers.
- **Systèmes de drainage améliorés :** Dans les zones particulièrement exposées aux inondations, les infrastructures de transport doivent être équipées de systèmes de drainage performants. Ces systèmes permettent d'évacuer rapidement les eaux pluviales pour éviter les accumulations dangereuses sur les routes et les voies ferrées, garantissant ainsi la sécurité des usagers et minimisant les interruptions de service.
- **Peinture blanche sur les rails et les infrastructures routières :** Inspirée des pratiques en Corée du Sud et au Japon, la peinture blanche sur les rails et les routes vise à réduire l'absorption de chaleur, limitant ainsi les risques de dilatation et de fissuration des infrastructures pendant les vagues de chaleur estivales. Cependant, son efficacité à long terme reste encore à prouver et nécessite des expérimentations supplémentaires pour confirmer ses bénéfices durables.
- **Systèmes de refroidissement des rails :** Face aux vagues de chaleur, des systèmes de refroidissement des rails, tels que les sprinklers, sont utilisés pour éviter leur dilatation excessive. Cette technologie, déjà déployée dans plusieurs pays, est en cours d'évaluation en France pour être appliquée dans les zones les plus exposées.



Source : SNCF Réseau – Augmentation des températures et impact sur les services ferroviaires (2024)

Le secteur des transports fait face à des défis majeurs posés par le changement climatique, notamment en termes de résilience et d'adaptation de ses infrastructures. Les innovations technologiques, telles que les capteurs connectés, les systèmes de gestion intelligents, et les matériaux résilients, jouent un rôle central dans l'amélioration de la capacité des infrastructures à résister aux événements climatiques extrêmes. La transition vers des modes de transport moins émissifs, comme le ferroviaire, et l'intégration de solutions durables pour adapter les infrastructures aériennes et maritimes aux nouveaux contextes climatiques et énergétiques sont des priorités stratégiques. L'adoption de carburants alternatifs, tels que les carburants d'aviation durables (SAF) ou l'exploration de la propulsion nucléaire pour les grands navires, ouvre des perspectives prometteuses pour décarboner ces secteurs tout en renforçant leur résilience. Cependant, cette transformation exige des investissements massifs, un soutien réglementaire cohérent, ainsi qu'une coopération étroite entre les acteurs publics et privés pour garantir la durabilité du réseau de transport, répondre aux attentes climatiques, et assurer la continuité des services pour les décennies à venir.

3.7. Santé

La santé l'un des secteurs les plus vulnérables aux impacts du changement climatique, avec des répercussions profondes à court et à long terme qui affectent tant les populations que les infrastructures sanitaires. L'augmentation des vagues de chaleur, la modification de la répartition géographique des maladies vectorielles, et les risques accrus liés aux événements climatiques extrêmes sont autant de facteurs qui exacerbent les pressions sur les systèmes de santé, rendant nécessaire une adaptation rapide et efficace pour protéger les populations vulnérables,

maintenir la qualité des soins, renforcer la résilience des infrastructures, et prévenir les crises sanitaires. Le troisième Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC) accorde une attention particulière aux défis que posent les vagues de chaleur, les maladies vectorielles, et les risques psychosociaux pour l'avenir de la France. Face à ces enjeux critiques, il devient impératif d'explorer les solutions technologiques et de mieux comprendre les enjeux stratégiques associés à l'adaptation du secteur de la santé. Ce chapitre se concentre sur l'analyse détaillée de ces solutions technologiques et des principaux défis à relever pour garantir une adaptation durable du secteur de la santé face au réchauffement climatique.

3.7.1. ENJEUX POUR LA SANTÉ

Le secteur de la santé est fortement affecté par les effets du changement climatique. Les impacts sanitaires sont divers et touchent à plusieurs niveaux :

- **Vagues de chaleur et événements météo extrêmes :** Comme illustré dans l'infographie en section 2.3 de Météo-France basée sur les travaux du GIEC (2023), les épisodes de chaleur extrême sont de plus en plus fréquents et prolongés, avec des températures exceptionnellement chaudes augmentant de 1,9°C pour une hausse moyenne globale de +1,5°C. Ces vagues de chaleur exacerbent la mortalité, notamment chez les personnes vulnérables (personnes âgées, enfants, personnes atteintes de maladies chroniques). Le stress thermique aggrave les conditions médicales existantes et augmente les hospitalisations. En France, la canicule de 2003 a causé près de 15 000 décès supplémentaires, illustrant l'urgence d'améliorer la résilience des systèmes de santé. Par ailleurs, les impacts des événements climatiques extrêmes ne se limitent pas à la chaleur : au Pakistan, les inondations de 2022 ont causé plus de 1 500 morts et 12 000 blessés,

soulignant la nécessité d'adapter les infrastructures et les systèmes de santé face à des crises de plus en plus fréquentes et graves. À mesure que les températures globales augmentent (+2°C ou +4°C), ces phénomènes s'intensifieront, imposant des défis croissants en matière de gestion des infrastructures et de protection des populations. Le rôle des transports, en particulier l'aviation long courrier, dans la prolifération des maladies et des vecteurs de maladies, doit également être souligné, car il facilite l'expansion rapide des épidémies à l'échelle mondiale.

- **Maladies vectorielles** : Le réchauffement climatique permet à certaines maladies vectorielles, comme la dengue, le chikungunya et le paludisme, de se propager dans des régions auparavant épargnées, y compris en France. Les températures plus élevées favorisent la prolifération de vecteurs comme les moustiques, représentant un risque accru pour la santé publique. Des études montrent que le réchauffement climatique pourrait étendre l'aire de répartition des moustiques vecteurs de ces maladies à de nouvelles régions de l'Europe, augmentant le risque d'épidémies.
- **Prolifération des bactéries** : Le réchauffement climatique favorise la prolifération des bactéries et cyanobactéries dans les eaux au-delà de 17°C, ce qui soulève des risques importants pour la santé publique. Des recherches approfondies en écologie microbienne sont nécessaires pour garantir la qualité de l'eau potable.
- **Risques psychosociaux** : Les événements climatiques extrêmes, tels que les inondations ou les tempêtes, ainsi que les déplacements forcés de population, entraînent des problèmes psychosociaux croissants, notamment le stress post-traumatique, la dépression et l'anxiété.
- **Impact des pesticides** : L'augmentation des températures et les périodes de sécheresse intensifient la concentration des polluants dans l'eau, y compris ceux issus des pesticides. Ces produits chimiques, largement utilisés en agriculture, peuvent avoir des répercussions graves sur la santé humaine, en particulier lors de la consommation d'eau contaminée en période d'étiage.

3.7.2. ENJEUX TECHNOLOGIQUES

L'adaptation du secteur de la santé à la nouvelle réalité climatique présente plusieurs défis technologiques et organisationnels :

- **Infrastructures vieillissantes** : De nombreux hôpitaux en France sont anciens et ne sont pas conçus pour résister à des épisodes de chaleur extrême ou à d'autres événements climatiques. Leur modernisation, tout en maintenant les opérations quotidiennes, représente un défi important tant sur le plan technique que financier.
- **Dépendance énergétique** : Le fonctionnement des systèmes de santé repose fortement sur un approvisionnement énergétique stable, que

ce soit pour la climatisation ou les équipements médicaux. L'intégration de solutions de back-up, comme les groupes électrogènes, reste essentielle pour garantir la résilience des hôpitaux en période de crise. Par ailleurs, l'adoption progressive de solutions de stockage d'énergie décarbonées, telles que les batteries, vise à réduire l'empreinte carbone de ces systèmes, bien que cela relève davantage de la mitigation que de l'adaptation.

- **Collaboration intersectorielle** : La lutte contre les maladies vectorielles et la gestion des crises sanitaires liées au climat nécessitent une collaboration étroite entre les autorités sanitaires, les scientifiques, les ingénieurs, et les gouvernements locaux. Pour renforcer cette coopération, il est impératif de développer des plateformes de coordination efficaces, capables de faciliter le partage d'informations, la mise en œuvre de stratégies communes, et la gestion des ressources en temps réel. Sur le plan international, la collaboration dans le domaine de la santé requiert une approche nuancée, prenant en compte les réalités et les priorités des BRICS, qui représentent plus de la moitié de l'humanité et deux tiers de la surface émergée. Le développement conjoint de solutions adaptées aux contextes locaux est essentiel, impliquant non seulement le transfert de technologies, mais aussi le partage des meilleures pratiques et la mutualisation des efforts de recherche pour relever les défis sanitaires globaux liés au changement climatique.

3.7.3. SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES POUR L'ADAPTATION

- **Résilience des établissements de santé** : Face à l'augmentation des vagues de chaleur, les établissements de santé doivent être équipés de systèmes de climatisation efficaces pour garantir des conditions de soins optimales. Cependant, ces systèmes doivent être conçus pour minimiser leur consommation énergétique et leur impact environnemental. Les pompes à chaleur, combinées à des systèmes de ventilation naturelle, sont des solutions privilégiées pour offrir un confort thermique tout en réduisant la demande en énergie. Les hôpitaux et autres infrastructures de santé doivent également être renforcés pour résister aux événements climatiques extrêmes, tels que les inondations, les tempêtes, et les séismes. Cela inclut la mise en place de systèmes de secours pour l'alimentation électrique, la protection contre les inondations, et la création de zones sécurisées au sein des établissements pour abriter les patients et le personnel en cas de crise.
- **Systèmes d'alerte précoce pour les vagues de chaleur** : Le développement de technologies prédictives et de systèmes d'alerte précoce basés sur des modèles météorologiques est essentiel pour prévenir et anticiper les effets des vagues de chaleur sur la santé publique. Ces alertes permettent de prendre des mesures préventives,

comme l'activation de plans d'urgence dans les hôpitaux ou l'organisation de soins pour les populations à risque (mise en place de centres de rafraîchissement et distribution de ressources aux populations les plus vulnérables).

- **Gestion des infrastructures d'eau et d'assainissement** : La gestion des eaux usées et la qualité de l'eau sont des facteurs clés pour la santé publique, surtout en période de canicule où le risque de prolifération de bactéries et de cyanobactéries dans les sources d'eau augmente. L'utilisation de capteurs avancés pour surveiller la qualité de l'eau et la mise en place de systèmes de traitement des eaux usées plus efficaces permettent de limiter ces risques.
- **Surveillance et prévention des maladies vectorielles** : Le changement climatique favorise l'expansion géographique des vecteurs de maladies, tels que les moustiques transmettant la dengue, le chikungunya, ou le paludisme. Pour répondre à cette menace, il est crucial de renforcer les systèmes de surveillance épidémiologique, en utilisant des technologies telles que les capteurs environnementaux, les drones pour la cartographie des zones à risque. Le déploiement de ces systèmes de surveillance automatisés, intégrant l'intelligence artificielle, permet de suivre la propagation des vecteurs de maladies comme les moustiques et aide les autorités sanitaires à prendre rapidement des mesures pour limiter les épidémies, telles que des campagnes de vaccination ciblées ou des traitements préventifs.
- **Développement de vaccins et de traitements adaptés** : L'adaptation du secteur de la santé inclut également la recherche et le développement de nouveaux vaccins et traitements pour les maladies vectorielles dont l'incidence pourrait augmenter avec le changement climatique. Cela nécessite une collaboration étroite entre les institutions de recherche, les entreprises pharmaceutiques, et les autorités sanitaires pour accélérer le développement et la distribution de ces solutions.
- **Téléconsultation et télémédecine** : L'intégration de technologies numériques dans la gestion des soins est essentielle pour améliorer la résilience des infrastructures de santé. Les systèmes de gestion électronique des dossiers médicaux, les plateformes de télémédecine, et les outils de gestion de crise permettent une coordination efficace des soins et une réponse rapide aux urgences climatiques. Face aux inondations, tempêtes ou vagues de chaleur qui rendent les déplacements difficiles, la téléconsultation devient un outil essentiel pour assurer la continuité des soins. Au-delà de la télémédecine, garantir un accès aux soins dans tous les territoires, surtout lors des crises climatiques (par exemple, en période de canicule), est essentiel. Les nouveaux outils numériques et de gouvernance peuvent jouer un rôle clé dans cette accessibilité renforcée. Les outils numériques et les systèmes de télémédecine, bien que nécessaires pour répondre aux défis climatiques, exigent une gestion énergétique op-

timisée pour éviter de renforcer la dépendance aux énergies fossiles.

- **Accès aux soins en situation de crise** : Il est essentiel de garantir que les populations vulnérables aient un accès rapide aux soins en cas de crise climatique. Cela peut inclure la mise en place de cliniques mobiles, la distribution de kits de soins d'urgence, et l'utilisation de la télémédecine pour fournir des consultations à distance lorsque l'accès aux infrastructures de santé est limité.

3.7.4. ENJEUX SOCIAUX ET GOUVERNANCE EN SANTÉ

- **Coordination intersectorielle et collaboration internationale** : L'adaptation du secteur de la santé nécessite une coordination efficace entre les différents secteurs, y compris les services sociaux, les autorités locales, et les agences nationales de santé. Cette coordination est cruciale pour mettre en œuvre des plans d'adaptation cohérents et pour mobiliser les ressources nécessaires en temps de crise. Le partage des connaissances et des meilleures pratiques à l'échelle internationale est essentiel pour renforcer la capacité des systèmes de santé à s'adapter aux défis climatiques. Les collaborations avec des organisations internationales, telles que l'Organisation mondiale de la santé (OMS), et la participation à des réseaux de recherche mondiaux sont des éléments clés pour améliorer la résilience du secteur de la santé.
- **Politiques de santé publique adaptées au climat** : Les politiques de santé publique doivent être révisées pour intégrer les risques climatiques. Cela inclut la mise en place de programmes nationaux de surveillance de la santé en lien avec le changement climatique, le renforcement des capacités de réponse des systèmes de santé, et l'allocation de ressources spécifiques pour l'adaptation climatique dans le budget de la santé publique.
- **Recherche sur les impacts climatiques sur la santé** : La recherche sur les liens entre changement climatique et santé doit être intensifiée pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents et pour développer des interventions efficaces. Cela inclut l'étude des impacts des vagues de chaleur, des maladies vectorielles, et de la pollution atmosphérique sur la santé publique, ainsi que le développement de technologies de prévention et de traitement innovantes.

L'adaptation du secteur de la santé au changement climatique est un défi complexe qui nécessite une approche multidimensionnelle, intégrant des solutions technologiques, des réformes institutionnelles, et une coordination intersectorielle. Les investissements dans ces domaines sont essentiels pour protéger les populations, maintenir la qualité des soins, et prévenir les crises sanitaires liées aux impacts climatiques futurs. Le succès de l'adaptation du sec-

teur de la santé dépendra d'une approche proactive, avec des actions immédiates pour renforcer les systèmes existants et des stratégies à long terme.

3.8. Défense

Le changement climatique présente des défis stratégiques importants pour la défense nationale. Les événements climatiques extrêmes tels que les inondations, les tempêtes et les vagues de chaleur affectent la sécurité des infrastructures militaires, la mobilité des troupes, et les capacités de réponse rapide en cas de crise. De plus, ces changements augmentent les tensions géopolitiques, notamment en ce qui concerne les ressources naturelles comme l'eau et les territoires habitables, ce qui intensifie la nécessité de technologies adaptées pour la défense.

3.8.1. ENJEUX DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LES OPÉRATIONS MILITAIRES

Le changement climatique a des conséquences directes sur les capacités opérationnelles des forces armées françaises. Les effets des événements climatiques extrêmes (températures élevées, précipitations intenses, ouragans, etc.) imposent une adaptation des infrastructures et des équipements militaires, et modifient les environnements dans lesquels les soldats doivent opérer. Les tensions géopolitiques liées à la raréfaction des ressources naturelles aggravent ces défis, forçant les forces armées à anticiper et à intégrer des stratégies d'adaptation climatiques.

- **Températures extrêmes** : Les zones de déploiement comme le Sahel ou le Moyen-Orient voient régulièrement les températures dépasser 40°C. Cela expose les soldats à des risques d'hyperthermie et réduit l'efficacité des équipements militaires (comme les hélicoptères, véhicules blindés, etc.). Les équipements militaires doivent être adaptés à ces températures extrêmes pour maintenir la capacité opérationnelle des forces armées dans ces régions.
- **Précipitations et inondations** : Les précipitations plus fréquentes et intenses, notamment en Afrique, perturbent les opérations militaires et humanitaires, rendant les infrastructures routières et logistiques impraticables. Dans des zones comme le Sahel, ces inondations exacerbent les tensions liées à l'instabilité climatique et compliquent la coordination des interventions militaires.
- **Ouragans et tempêtes hivernales** : Les infrastructures militaires françaises, en particulier les bases navales situées sur les côtes de l'Atlantique et dans les régions tropicales, subissent régulièrement des dégâts causés par des tempêtes hivernales et des ouragans. Cela perturbe non seulement les opérations, mais également la

maintenance des équipements stratégiques, tels que les navires militaires.

- **Élévation du niveau et de la température de la mer** : Les bases militaires côtières, qu'il s'agisse des bases navales ou des installations de l'armée, sont confrontées à l'érosion et à la montée des eaux. Cela impose des renforcements structurels pour protéger les infrastructures critiques.

3.8.2. ENJEUX GÉOPOLITQUES AMPLIFIÉS PAR LE CLIMAT

Le changement climatique agit également comme un catalyseur de tensions géopolitiques, notamment dans les régions fragiles où la compétition pour les ressources naturelles s'intensifie.

- **Conflits liés au climat** : L'insécurité alimentaire et les migrations forcées, accentuées par le changement climatique, sont susceptibles de provoquer des conflits dans des zones déjà instables, telles que l'Afrique de l'Ouest. Les forces armées doivent non seulement s'adapter aux conditions climatiques extrêmes, mais aussi préparer des réponses face à des crises humanitaires et des déplacements de populations massifs dus à la dégradation de l'environnement.
- **Coopération internationale en matière de sécurité climatique** : La sécurité climatique nécessite une coopération renforcée entre les forces armées internationales pour partager des renseignements, des technologies et des capacités de réponse rapide face aux menaces climatiques. La France joue un rôle actif dans des exercices conjoints et dans le développement de technologies de défense climatique pour mieux anticiper les risques climatiques globaux.

3.8.3. TECHNOLOGIES CLÉS POUR L'ADAPTATION DES INFRASTRUCTURES ET EQUIPEMENTS MILITAIRES

- **Hélicoptères de combat** : Les simulations montrent que dans des environnements où les températures avoisinent les 40°C, comme au Moyen-Orient, la capacité d'emport des hélicoptères est considérablement réduite. Cela affecte leur efficacité en mission. Les solutions incluent l'adaptation des moteurs et des systèmes de refroidissement pour améliorer leur performance dans des conditions de chaleur extrême.
- **Systèmes électroniques et armes modernes** : La hausse des températures augmente les risques de défaillance des systèmes électroniques et des armes modernes, qui nécessitent un refroidissement constant pour fonctionner correctement. Le développement de systèmes de refroidissement améliorés, comme les systèmes hybrides, est une priorité pour maintenir la fonctionnalité des équipements militaires dans des environnements à forte chaleur.

- **Bases militaires résilientes** : Le renforcement des bases militaires côtières et terrestres pour les rendre résistantes aux événements climatiques extrêmes est indispensable. Les infrastructures côtières nécessitent des protections contre l'érosion et la montée des eaux, tandis que les bases terrestres doivent être équipées de systèmes de drainage pour prévenir les inondations.
- **Capteurs et systèmes de surveillance connectés** : Les capteurs IoT installés dans les infrastructures militaires permettent de détecter en temps réel les dégradations dues aux phénomènes climatiques extrêmes, comme la dilatation des matériaux ou les fissures dans les structures, garantissant ainsi une intervention rapide et une maintenance préventive.
- **Uniformes et équipements adaptés aux conditions climatiques extrêmes** : Les uniformes des soldats doivent être conçus pour garantir une meilleure ventilation et une isolation thermique appropriée en fonction des environnements dans lesquels ils opèrent. Les nouvelles technologies permettent de créer des uniformes plus légers, résistants à l'humidité et capables de maintenir une température corporelle adéquate.
- **Systèmes de gestion énergétique autonomes** : L'utilisation de microgrids dans les bases militaires permet d'assurer une continuité énergétique en cas de perturbations climatiques. Ces systèmes autonomes garantissent que les bases situées dans des régions reculées ou à risques climatiques puissent maintenir leurs opérations même en cas de pannes électriques.

3.8.4. IMPACTS ET ADAPTATION DES FORCES ARMÉES

Le changement climatique modifie profondément les conditions dans lesquelles les forces armées doivent opérer, exigeant une adaptation constante des infrastructures, des équipements, et des stratégies. Les infrastructures militaires doivent être renforcées pour faire face aux inondations et à l'érosion côtière, tandis que les soldats doivent être formés pour intervenir dans des environnements de plus en plus hostiles. Des stratégies logistiques résilientes doivent également être mises en place pour maintenir la flexibilité des opérations militaires.

Le secteur de la défense doit s'adapter aux réalités du changement climatique en intégrant des technologies avancées pour renforcer les infrastructures, améliorer les équipements militaires et garantir une capacité de réponse rapide face aux crises humanitaires et aux tensions géopolitiques accrues par les conditions climatiques. L'investissement dans ces technologies et la coopération internationale sont essentiels pour maintenir la sécurité nationale et internationale.

3.9. Spatial

Le secteur spatial est un acteur clé dans la compréhension des impacts du changement climatique grâce aux technologies spatiales. Les satellites d'observation permettent une surveillance fine des phénomènes climatiques, tandis que les infrastructures spatiales elles-mêmes doivent s'adapter aux nouvelles conditions atmosphériques et climatiques.

3.9.1. CONTRIBUTIONS DU SECTEUR SPATIAL À L'ADAPTATION

Le secteur spatial joue un rôle central dans la surveillance et la compréhension des changements climatiques à l'échelle mondiale. Les technologies spatiales, telles que les satellites d'observation, permettent de recueillir des données essentielles sur les phénomènes climatiques extrêmes et sur la transformation des écosystèmes. D'autre part, les satellites aident à maintenir la capacité de télécommunications en cas de dégâts des intempéries sur le réseau terrestre. Toutefois, le secteur spatial lui-même est impacté par les effets du changement climatique, notamment au niveau des infrastructures spatiales et des opérations de lancement.

- **Observation des changements climatiques** : Les satellites d'observation permettent de suivre des phénomènes tels que la fonte des glaces, l'élévation du niveau des mers et la désertification. Ces données sont cruciales pour la gestion des risques géopolitiques et pour anticiper les impacts climatiques sur les infrastructures critiques.
- **Satellites d'observation climatique** : Les satellites d'observation, tels que le programme TRISHNA, jouent un rôle essentiel dans la collecte de données thermiques et climatiques pour surveiller la gestion des ressources en eau et les phénomènes climatiques extrêmes. Ces satellites fournissent des données précieuses pour la planification de la réponse climatique.
- **Systèmes de communication par satellite résilients** : Les satellites de communication contribuent à la continuité des transmissions en cas de crises, garantissant ainsi une coordination efficace lors des crises. Les innovations se concentrent sur le renforcement des réseaux satellitaires.
- **Satellites intelligents et capteurs avancés** : Les nouveaux satellites équipés de capteurs plus performants peuvent détecter en temps réel des phénomènes comme la pollution atmosphérique, les tempêtes et les vagues de chaleur. Ces informations sont essentielles pour la gestion des crises climatiques et permettent aux gouvernements et aux forces armées de réagir plus rapidement et efficacement. Les satellites intelligents permettent également une meilleure anticipation des phénomènes climatiques majeurs, facilitant ainsi la planification des interventions dans les zones touchées par des catastrophes naturelles.

- **Technologies de propulsion durable** : La recherche dans le domaine des moteurs à propulsion vise à réduire l'empreinte carbone des lancements spatiaux tout en assurant une performance optimale dans des conditions climatiques changeantes. Ces technologies sont cruciales pour minimiser l'impact environnemental du secteur spatial tout en maintenant une capacité d'exploration et d'observation efficace.
- **Observation en temps réel** : Les améliorations technologiques en matière d'imagerie et de télédétection permettent une observation continue et en temps réel des catastrophes naturelles majeures, comme les incendies, les inondations et les ouragans. Cela facilite les interventions militaires et humanitaires dans les zones touchées par des catastrophes climatiques.

3.9.2. PROGRAMMES SPATIAUX ET INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

Plusieurs programmes spatiaux en collaboration avec des agences comme le CNES et l'ESA contribuent directement à l'adaptation au changement climatique. Ces projets permettent de surveiller et de collecter des données précises sur les phénomènes climatiques extrêmes, tout en développant des technologies pour renforcer la résilience des infrastructures spatiales.

- **TRISHNA (Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment)** : Ce programme franco-indien permet une gestion des ressources en eau grâce à l'observation thermique de la Terre. Les données collectées sont cruciales pour les régions vulnérables à la sécheresse, et peuvent également être utilisées pour renforcer la résilience des bases militaires situées dans des zones arides.
- **Satellite SWOT (Surface Water and Ocean Topography)** : Ce programme, lancé en collaboration avec la NASA et le CNES, mesure les niveaux d'eau des rivières, fleuves, et réservoirs à l'échelle mondiale. Ces données sont essentielles pour anticiper les pénuries d'eau et pour gérer stratégiquement les ressources dans les zones de conflits ou de crises humanitaires exacerbées par les effets du changement climatique.
- **Galileo** : Le système de navigation par satellite européen, crucial pour la défense et les missions humanitaires, permet de coordonner avec précision les opérations militaires et civiles. Galileo est également un outil précieux pour cartographier les impacts climatiques et assurer une réponse efficace aux catastrophes naturelles.
- **Satellites intelligents** : Les satellites de nouvelle génération équipés de capteurs avancés fournissent des informations en temps réel sur des phénomènes tels que la pollution atmosphérique, les vagues de chaleur, et les tempêtes. Ces données permettent de mieux gérer les réponses militaires et humanitaires dans des zones impactées par le changement climatique.
- **Technologies de propulsion durable** : L'innovation dans les moteurs à propulsion réduit l'empreinte carbone des lancements spatiaux tout en augmentant l'efficacité des missions d'exploration et de surveillance. Ces technologies sont essentielles pour adapter le secteur spatial aux réalités climatiques actuelles.

Le secteur spatial est à la pointe de la lutte contre le changement climatique grâce à ses capacités de surveillance et d'observation. Les innovations technologiques dans les systèmes de communication par satellite, les capteurs avancés, et les technologies de propulsion durable sont essentielles pour garantir la résilience des infrastructures spatiales. En parallèle, le renforcement des infrastructures aéroportuaires et la collaboration internationale dans des projets spatiaux, tels que Copernicus, permettent de mieux anticiper et répondre aux crises climatiques à l'échelle mondiale.

Synthèse des technologies d'adaptation



L'accélération de l'adaptation technologique au changement climatique repose en grande partie sur l'émergence de nouvelles technologies et de solutions innovantes. Ces innovations sont cruciales pour répondre aux défis spécifiques posés par les impacts climatiques, qu'il s'agisse de la gestion des ressources, de la protection des infrastructures ou de la résilience des écosystèmes. En France, plusieurs innovations prometteuses se distinguent dans divers secteurs, soutenues par des programmes de recherche et des initiatives publiques et privées. Ces innovations R&D, attendues dans des domaines clés tels que la science des bâtiments, l'amélioration des modèles climatiques, le développement de technologies satellitaires et de la métrologie associée, ainsi que des avancées en microbiologie, sont essentielles pour renforcer la résilience face aux changements climatiques. Par ailleurs, ces travaux s'appuient sur les progrès déjà réalisés, notamment dans les domaines des réseaux électriques intelligents et des technologies qualifiées de 'Game Changers'. Il est important de continuer à exploiter ces avancées pour accélérer les efforts d'adaptation.

4.1. Technologies de gestion des ressources en eau

- **Systèmes d'irrigation intelligents** : L'optimisation de l'irrigation grâce à des technologies avancées est une priorité pour réduire la consommation d'eau tout en maintenant la productivité agricole. Des systèmes de gestion automatisée de l'eau, qui intègrent des capteurs IoT, des algorithmes d'intelligence artificielle (IA) et des images satellitaires, permettent une irrigation précise en fonction des besoins réels des cultures.
- **Micro-irrigation** : Ce système, qui délivre de petites quantités d'eau directement à la racine des plantes, réduit la consommation d'eau de 30 à 40 % sans compromettre les rendements agricoles.
- **Réutilisation des eaux usées traitées** : Cette technologie consiste à utiliser les eaux traitées pour l'irrigation, contribuant à pallier les déficits en eau. Environ 30 % des rivières en France sont alimentées par des stations d'épuration. Cependant, l'utilisation des eaux usées doit être encadrée pour éviter la contamination des sols et des conflits d'usage.
- **Stockage de l'eau** : Des réservoirs souterrains ou en surface sont envisagés pour conserver l'eau en période de stress hydrique et éviter les conflits d'usage. Cette méthode est une réponse aux fluctuations temporelles et géographiques des ressources en eau.
- **Recharge des nappes phréatiques** : Face à la diminution de la disponibilité de l'eau, des techniques de recharge artificielle des nappes phréatiques, telles que l'injection d'eau traitée ou la création de bassins d'infiltration, sont expérimentées pour maintenir une ressource en eau durable, même en cas de sécheresse prolongée.
- **Modélisation des précipitations et dimensionnement des réseaux** : La modélisation précise des précipitations futures est cruciale pour adapter les infrastructures hydrauliques aux nouvelles réalités climatiques. En France, des outils de modélisation sont développés pour simuler les événements extrêmes tels que les pluies diluviennes, permettant ainsi de dimensionner correctement les réseaux de gestion des eaux pluviales et d'assurer leur efficacité à long terme.
- **Systèmes de rétention et de gestion des eaux pluviales** : Pour faire face aux épisodes de précipitations extrêmes, des bassins de rétention et des systèmes de recyclage des eaux usées sont développés pour réduire la vulnérabilité des infrastructures urbaines.
- **Système de détection des fuites** : L'amélioration des infrastructures et la mise en place de technologies de détection des fuites sont essentielles pour réduire ces fuites, en particulier dans les

zones rurales où les réseaux sont plus étendus et donc plus difficiles à entretenir.

- **Capteurs environnementaux et surveillance des ressources hydriques** : Le développement de capteurs environnementaux pour surveiller en temps réel la qualité et la quantité des ressources en eau est essentiel pour une gestion proactive des crises liées à la sécheresse ou à la pollution. Ces capteurs, déployés dans les rivières, les lacs, et les nappes phréatiques, fournissent des données cruciales pour anticiper les pénuries d'eau et optimiser les stratégies de gestion.
- **Dessalement de l'eau de mer** : Bien que coûteux et énergivore, le dessalement de l'eau de mer est envisagé comme une solution potentielle pour les régions côtières souffrant de pénuries d'eau. Les recherches actuelles se concentrent sur le développement de technologies de dessalement plus efficaces et moins consommatrices en énergie, ainsi que sur la gestion des résidus salins produits par le processus.
- **Réoxygénation et traitements innovants** : La réoxygénation des plans d'eau, pour lutter contre l'eutrophisation et la désoxygénation, devient essentielle face aux conséquences du changement climatique. Des technologies spécifiques sont développées pour restaurer les écosystèmes aquatiques tout en respectant la biodiversité.
- **Développement de traitements avancés** : Mettre en œuvre des traitements tertiaires et quaternaires pour les eaux usées afin d'éliminer les micropolluants et garantir une eau potable de qualité.

4.2. Technologies de résilience énergétique

- **Modernisation des réseaux électriques** : Accélérer l'enfouissement des lignes électriques, moderniser les postes de transformation, et développer les smart grids pour anticiper et gérer les incidents climatiques.
- **Smart grids (réseaux électriques intelligents)** : Les smart grids représentent une innovation clé pour renforcer la résilience des réseaux électriques face aux événements climatiques extrêmes. Ces réseaux intègrent des technologies de communication et de gestion de l'énergie en temps réel, permettant une meilleure gestion des flux d'énergie et une réponse rapide aux perturbations. Enedis, par exemple, investit dans le développement de smart grids pour améliorer la résilience de son réseau de distribution, notamment par l'intégration de sources d'énergie renouvelables et de solutions de stockage.
- **Stockage d'énergie avancé** : Le stockage de l'énergie est un enjeu majeur pour assurer une alimentation électrique stable, notamment en cas de perturbations climatiques. Il est essentiel de

renforcer le développement des technologies de stockage, telles que les batteries à haute densité et les systèmes de stockage par pompage-turbinage, pour garantir la résilience énergétique. Les batteries à haute densité, les volants d'inertie, et les systèmes de stockage d'énergie par pompage-turbinage sont des solutions prometteuses pour garantir une disponibilité continue de l'énergie, même lorsque les sources renouvelables sont intermittentes.

- **Microgrids autonomes** : Les microgrids, ou micro-réseaux électriques, sont des systèmes autonomes capables de fonctionner indépendamment du réseau principal. Ils sont particulièrement utiles dans les zones rurales et isolées afin d'assurer une alimentation continue et résiliente en cas de crises climatiques. Ces microgrids peuvent intégrer des sources d'énergie renouvelable, comme le solaire ou l'éolien, et des systèmes de stockage, offrant ainsi une solution résiliente pour les infrastructures critiques.
- **Énergies renouvelables et technologies de prévision climatique** : EDF, Enedis et ENGIE investissent dans l'amélioration des modèles climatiques et des technologies de prévision pour identifier les meilleures zones d'implantation de parcs solaires et éoliens. Ces modèles permettent aussi de prévoir les risques liés aux conditions météorologiques extrêmes et d'optimiser la gestion des parcs existants.
- **Optimisation de la gestion des réseaux électriques** : Enedis met en place des solutions de gestion préventive pour limiter l'impact des événements climatiques. Cela inclut l'utilisation de technologies de surveillance à distance pour diagnostiquer et anticiper les pannes, ainsi que le développement de démonstrateurs de microgrids pour explorer les solutions locales.
- **Photovoltaïque résilient** : Les infrastructures photovoltaïques, comme les systèmes agrivoltaïques, doivent être conçues pour résister aux températures extrêmes et aux épisodes de grêle plus fréquents. Les modèles climatiques sont utilisés pour évaluer ces risques et adapter les équipements en conséquence.
- **Adaptation des centrales nucléaires** : Le renforcement de la résistance des centrales nucléaires aux variations climatiques en déployant des technologies de refroidissement alternatives et en réduisant les prélèvements d'eau. EDF travaille sur des systèmes de refroidissement alternatifs pour ses centrales nucléaires, moins gourmands en eau, afin de répondre aux défis posés par la raréfaction des ressources hydriques. Des technologies plus économes en eau sont également déployées pour assurer la continuité de la production d'électricité pendant les vagues de chaleur.

4.3. Technologies de résilience de l'agriculture

- **Sélection variétale** : Le développement de variétés végétales résistantes à la sécheresse, au stress hydrique et à la salinité est crucial pour maintenir la productivité agricole. Les plantes à enracinement profond, une meilleure efficacité hydrique et la précocité sont quelques-unes des caractéristiques ciblées. Les techniques de sélection telles que l'hybridation, la mutagénèse, la transgénèse et l'édition du génome permettent de créer des variétés plus adaptées aux nouvelles conditions climatiques.
- **Agroécologie et agroforesterie** : L'agroécologie, en encourageant la diversification des cultures et en utilisant des processus naturels pour améliorer la résilience des systèmes agricoles, réduit la vulnérabilité des cultures aux extrêmes climatiques. L'agroforesterie, intégrant les arbres aux cultures, protège contre les aléas climatiques et améliore la résilience à long terme des exploitations.
- **Micro-irrigation et technologies d'irrigation intelligentes** : Les systèmes de micro-irrigation permettent de délivrer de petites quantités d'eau directement à la racine des plantes, réduisant ainsi la consommation d'eau jusqu'à 40 % tout en préservant les rendements agricoles. Ces systèmes sont souvent couplés à des capteurs IoT, des sondes et des outils d'aide à la décision pour surveiller les niveaux d'humidité et optimiser l'irrigation en temps réel.
- **Modélisation climatique et prévisions agricoles** : Les technologies de modélisation avancée et les prévisions climatiques aident les agriculteurs à prendre des décisions éclairées sur les périodes de plantation, l'irrigation et la gestion des cultures. Ces outils permettent d'optimiser les calendriers agricoles et d'adapter les pratiques aux prévisions climatiques à court et long terme.
- **Agroéquipements intelligents** : L'utilisation de robots arroseurs, de robots de binage et de drones permet de surveiller les cultures à grande échelle et d'optimiser l'usage de l'eau et des intrants agricoles. Ces équipements automatisés offrent une gestion plus précise et efficace des ressources, améliorant la productivité et réduisant les impacts environnementaux.
- **Systèmes d'alerte précoce et gestion des crises climatiques** : L'agriculture doit aussi intégrer des systèmes d'alerte précoce pour les événements climatiques extrêmes comme les sécheresses, les vagues de chaleur, ou les inondations. Ces outils fournissent des informations en temps réel et des conseils pratiques pour minimiser les pertes agricoles.
- **Gestion des sols et lutte contre l'érosion** : La préservation de la qualité des sols est essentielle pour garantir la résilience des cultures face aux conditions climatiques changeantes. Des pra-

tiques comme le couvert végétal et le labour minimal aident à prévenir l'érosion, maintenir la fertilité des sols et conserver l'eau dans le sol.

- **Agrioltaïsme** : L'installation de panneaux solaires au-dessus des cultures permet de générer de l'énergie tout en protégeant les plantations du rayonnement direct du soleil. Cette technologie réduit les besoins en eau et préserve certaines cultures contre les conditions climatiques extrêmes, comme les vagues de chaleur.

4.4. Technologies d'urbanisme résilient

- **Isolation thermique et efficacité énergétique** : L'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments est essentielle pour réduire la consommation d'énergie, que ce soit pour le chauffage en hiver ou la climatisation en été. Les matériaux à inertie thermique, comme les briques ou la pierre, permettent de réguler la température intérieure en stockant et libérant la chaleur lentement, augmentant ainsi la résilience des bâtiments face aux vagues de chaleur.
- **Matériaux de construction résilients** : Le développement de matériaux de construction innovants, capables de résister aux conditions climatiques extrêmes, est essentiel pour renforcer la résilience des bâtiments. Il est essentiel d'accélérer la recherche dans la science du bâtiment pour mieux comprendre la thermorésilience des matériaux actuels, et adapter les pratiques de construction pour optimiser l'isolation et la ventilation. Les nouveaux matériaux, tels que les bétons à haute performance, les isolants thermiques avancés, et les revêtements résistant aux inondations, permettent de construire des infrastructures plus durables face aux vagues de chaleur, aux tempêtes, et aux inondations.
- **Végétalisation urbaine et infrastructures vertes** : Les solutions basées sur la nature, comme la végétalisation des toits et des murs, ainsi que l'intégration d'infrastructures vertes dans les villes, jouent un rôle clé dans l'atténuation des effets des îlots de chaleur urbains et dans l'amélioration de la résilience thermique des bâtiments. Ces innovations permettent également de gérer les eaux pluviales de manière durable, réduisant ainsi les risques d'inondation et améliorant la qualité de l'air en milieu urbain.
- **Pompes à chaleur et systèmes de ventilation avancés** : Dans un contexte de réchauffement climatique, l'installation de systèmes de climatisation écoénergétiques est indispensable pour garantir le confort et la sécurité des habitants, notamment lors des vagues de chaleur. Ces systèmes doivent être conçus pour minimiser la consommation d'énergie, avec des alternatives comme les systèmes de ventilation naturelle et les brise-soleil.

- **Adaptation et rénovation des infrastructures :** Le renforcement des infrastructures, telles que la modernisation des systèmes de drainage ou le renforcement des bâtiments anciens pour les rendre plus résistants aux tempêtes et aux vagues de chaleur, est essentiel pour adapter les zones urbaines aux nouvelles réalités climatiques. L'investissement dans des infrastructures de gestion des eaux pluviales et de rétention est un point clé afin de limiter les impacts des inondations et des précipitations extrêmes.
- **Plantation d'arbres et création d'espaces verts :** La création d'espaces verts en milieu urbain réduit les températures ambiantes, favorise l'infiltration de l'eau de pluie et contribue à la régulation des écosystèmes urbains. Certaines villes ont pour objectif de verdir jusqu'à 30 % de leur surface urbaine.
- **Transport urbain résilient :** Les infrastructures de transport doivent être adaptées aux événements climatiques extrêmes comme les inondations ou les vagues de chaleur. Cela inclut le renforcement des routes, ponts et infrastructures ferroviaires. Le développement des transports publics électrifiés et de la mobilité douce (pistes cyclables et piétonnes) est encouragé pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et améliorer la résilience des systèmes urbains.
- **Solutions côtières résilientes :** Pour les villes côtières, des digues, barrières anti-inondation et solutions basées sur la nature (telles que les mangroves et les marais) sont déployées pour lutter contre la montée du niveau de la mer.

4.5. Technologies pour l'industrie

- **Systèmes de refroidissement avancés :** Face aux vagues de chaleur de plus en plus fréquentes, les usines et installations industrielles subissent une forte demande pour des solutions de refroidissement. Les systèmes de refroidissement avancés, comme les refroidisseurs à air et les systèmes hybrides, permettent non seulement de maintenir une production stable, mais aussi de réduire considérablement la consommation d'eau, un élément crucial en période de sécheresse prolongée. Ces technologies sont capables de gérer les pics de chaleur tout en minimisant l'empreinte écologique des industries, en contribuant à l'adaptation des processus industriels face aux défis climatiques.
- **Digitalisation des chaînes logistiques :** La digitalisation, associée à l'intelligence artificielle (IA) et à l'analyse des données, transforme les chaînes logistiques en leur permettant de devenir plus résilientes aux perturbations climatiques. Ces technologies offrent une prévision améliorée des interruptions dans la chaîne d'approvisionnement, optimisent les itinéraires en cas de conditions climatiques extrêmes, et diversifient les

fournisseurs pour réduire la vulnérabilité face aux aléas. Les industries peuvent ainsi anticiper les retards et ajuster leurs stratégies en temps réel, réduisant les pertes et maximisant l'efficacité de la logistique.

- **Technologies de prévision et d'adaptation des procédés industriels :** L'intégration de capteurs IoT (Internet des objets) et de systèmes d'analyse en temps réel permet une gestion optimisée des procédés industriels face aux aléas climatiques. Ces capteurs surveillent les paramètres critiques des infrastructures industrielles, tels que la température, l'humidité et la pression, pour adapter les processus en fonction des conditions environnementales. Les données récoltées sont ensuite utilisées pour ajuster les machines et prévenir les interruptions, garantissant ainsi une continuité de la production, même en cas de conditions météorologiques extrêmes.
- **Efficacité énergétique dans les usines :** L'efficacité énergétique est devenue un enjeu clé pour les industries, notamment dans un contexte de changement climatique. L'optimisation des systèmes de gestion de l'énergie dans les usines permet de maintenir une production industrielle stable tout en réduisant la consommation énergétique globale. Des technologies comme les systèmes de gestion énergétique intelligents et les appareils à haute efficacité sont déployés pour minimiser les gaspillages et garantir une meilleure gestion des ressources en période de stress énergétique.
- **Microgrids pour les sites industriels :** Les microgrids, ou micro-réseaux autonomes, sont des solutions de plus en plus populaires pour assurer la continuité des opérations industrielles, surtout en cas de panne du réseau principal due à des événements climatiques extrêmes. Ces systèmes, qui intègrent des sources d'énergie renouvelable comme le solaire ou l'éolien, peuvent fonctionner de manière indépendante du réseau central, assurant ainsi une alimentation électrique continue pour les sites industriels stratégiques. Ils offrent une solution locale et résiliente face aux perturbations climatiques.
- **Matériaux résilients :** Pour que les infrastructures industrielles restent opérationnelles face aux conditions climatiques extrêmes, l'utilisation de matériaux capables de résister à ces variations est essentielle. Des matériaux plus robustes, tels que les bétons haute performance, les isolants thermiques avancés et des revêtements résistants aux inondations, permettent de construire des infrastructures plus durables. Ces matériaux sont conçus pour résister à des températures très élevées ou basses, tout en réduisant les impacts des tempêtes, inondations et autres événements climatiques sur les bâtiments industriels.
- **Recyclage et matériaux critiques :** La dépendance des industries à l'égard de certains matériaux critiques comme le cuivre, combinée aux risques posés par les interruptions des chaînes d'approvisionnement, renforce la nécessité de surveiller étroitement l'utilisation de ces res-

sources. L'intégration de matériaux recyclés dans les processus industriels devient un levier important pour renforcer la résilience des industries face aux perturbations. Cela permet de réduire la dépendance aux importations et de garantir une continuité des opérations, même en cas de crises climatiques globales.

- **Robotisation des processus industriels** : L'automatisation et la robotisation des usines jouent un rôle central dans l'optimisation des processus industriels en période de conditions climatiques difficiles. Les robots intelligents peuvent ajuster les opérations de manière précise et en temps réel, en réduisant la consommation d'énergie et en augmentant la productivité, même en cas de températures extrêmes. Cette adaptation rapide des processus de fabrication permet de mieux gérer les interruptions et d'assurer la continuité des activités industrielles.
- **Capteurs connectés pour la gestion des risques** : L'installation de capteurs connectés sur les infrastructures industrielles permet de surveiller les installations en temps réel et d'identifier rapidement les risques liés aux événements climatiques extrêmes. Ces capteurs mesurent les paramètres critiques tels que la dilatation des matériaux, les fissures dans les structures ou les variations de température, facilitant ainsi des interventions rapides pour éviter les pannes ou accidents majeurs.
- **Technologies pour les systèmes de refroidissement nucléaire** : EDF, parmi d'autres acteurs de l'énergie, travaille au développement de systèmes de refroidissement alternatifs pour les centrales nucléaires, moins dépendants des ressources en eau. Ces technologies sont essentielles pour faire face aux pénuries d'eau pendant les vagues de chaleur, permettant ainsi aux centrales de maintenir une production électrique stable tout en respectant les contraintes environnementales.

4.6. Technologies pour le transport

- **Renforcement des infrastructures de transport** : Les infrastructures de transport, telles que les routes, ponts, ports, tunnels, aéroports et voies ferrées, doivent être renforcées pour faire face aux aléas climatiques de plus en plus fréquents, comme les inondations, tempêtes, vagues de chaleur et éboulements. Cela implique des investissements majeurs dans la modernisation des infrastructures existantes pour les rendre plus résilientes. Par exemple, la mise à jour des systèmes de drainage est essentielle pour évacuer rapidement les eaux pluviales en cas de précipitations extrêmes. L'État et le Cerema travaillent activement sur la mise à jour des référentiels techniques nationaux, y compris un guide technique d'assainissement en cours de révision,

qui intègre ces problématiques. Ces efforts visent également à impulser une évolution des normes européennes et internationales, telles que les normes CEN et ISO.

- **Matériaux innovants pour les infrastructures** : L'adaptation des infrastructures passe par l'utilisation de matériaux capables de résister aux températures extrêmes et aux contraintes liées aux changements climatiques. Cela inclut des enrobés routiers résistant aux fortes chaleurs et aux cycles gel/dégel, ainsi que des alliages métalliques pour rails et caténaires permettant de réduire les risques de dilatation thermique. Ces avancées prolongent la durabilité des infrastructures et assurent une meilleure sécurité pour les usagers.
- **Capteurs connectés et gestion intelligente des infrastructures** : L'intégration de capteurs IoT sur les routes et les voies ferrées permet une surveillance en temps réel des infrastructures, notamment pour détecter les anomalies comme les fissures, les déformations et les surchauffes. Ces données permettent d'intervenir rapidement, d'optimiser la maintenance préventive et de réduire les risques d'interruption de service. Sur les infrastructures ferroviaires, ces capteurs aident également à gérer les températures des rails et des caténaires pour anticiper les impacts des vagues de chaleur.
- **Mobilité électrique et infrastructures de recharge résilientes** : Avec le développement croissant de la mobilité électrique, il est crucial que les infrastructures de recharge soient conçues pour résister aux aléas climatiques extrêmes tels que les tempêtes, les inondations et les vagues de chaleur. Les stations de recharge doivent être adaptées pour assurer leur fonctionnement dans des conditions difficiles, grâce à des technologies de gestion thermique avancées. Ces adaptations, bien que prioritaires à moyen terme, peuvent être intégrées progressivement lors des cycles de renouvellement des infrastructures de recharge (durée de vie moyenne de 10-15 ans).
- **Transports publics résilients et confort des passagers** : Les réseaux de transports publics, tels que les tramways, métros et bus électriques, doivent être renforcés non seulement au niveau des infrastructures, mais aussi dans la conception des services pour garantir la continuité même lors de conditions climatiques extrêmes. L'adaptation du matériel roulant est essentielle, notamment par l'intégration de systèmes de climatisation efficaces et moins énergivores, adaptés aux vagues de chaleur. Par ailleurs, l'utilisation de matériaux isolants à haute efficacité énergétique permet d'assurer le confort thermique des passagers.
- **Stratégies de stockage et de distribution des produits** : Dans le secteur de la logistique, le développement de centres de distribution stratégiquement situés, notamment à proximité des zones à risque, permet de sécuriser l'approvisionnement et de limiter les interruptions causées par les événements climatiques. Ces centres peuvent

s'appuyer sur des technologies de gestion intelligente pour ajuster les stocks en fonction des prévisions climatiques et répondre rapidement aux perturbations.

- **Systèmes de prévision et gestion des flux logistiques** : L'utilisation de modèles climatiques avancés et de systèmes de prévision permet d'optimiser les itinéraires et les stratégies d'approvisionnement dans le secteur du transport et de la logistique. Ces outils aident à anticiper les interruptions causées par des événements extrêmes, à ajuster les flux logistiques et à garantir une continuité des services essentiels.
- **Technologies de drainage avancées** : Le développement de systèmes de drainage innovants, adaptés aux précipitations diluviennes, est crucial pour réduire les risques d'inondation et limiter la dégradation des infrastructures. Ces technologies jouent un rôle clé pour assurer la continuité des services, notamment dans les zones particulièrement exposées aux aléas climatiques.
- **Digitalisation et maintenance en temps réel** : La digitalisation des infrastructures de transport permet une gestion proactive et intelligente des ressources allouées à la maintenance. Grâce aux systèmes connectés, les anomalies sont détectées rapidement, permettant une planification plus efficace des interventions. Cette approche réduit les coûts, améliore la sécurité des usagers et garantit la fiabilité des services.
- **Mobilisation des parties prenantes pour l'adaptation des transports** : L'adaptation des services et infrastructures de transport nécessite une coordination entre l'État, les autorités locales, les gestionnaires d'infrastructures et les producteurs de doctrine technique tels que le Cerema. Des groupes de travail ont été mis en place pour échanger les bonnes pratiques, notamment sur le confort thermique dans le matériel roulant, et pour favoriser une approche collaborative dans l'intégration des enjeux climatiques.

4.7. Technologies pour la santé

- **Systèmes d'alerte d'événements climatiques extrêmes** : Les systèmes d'alerte précoce utilisent des modèles climatiques avancés et des données en temps réel pour anticiper et prévenir les événements climatiques extrêmes ayant un impact direct sur la santé, comme les vagues de chaleur, et déclencher des plans d'urgence. Ces systèmes permettent de mettre en place des mesures préventives, telles que l'ouverture de centres de rafraîchissement, la distribution d'eau potable, et la protection des populations vulnérables, notamment les personnes âgées et les enfants.
- **Surveillance des maladies vectorielles** : Le changement climatique favorise l'expansion géographique des vecteurs de maladies, comme les

moustiques transmettant la dengue et le paludisme. Des technologies innovantes, telles que les capteurs environnementaux, les drones pour la cartographie des zones à risque, et l'intelligence artificielle pour l'analyse des données épidémiologiques, sont développées pour surveiller et contrôler ces vecteurs de manière proactive.

- **Renforcement des infrastructures hospitalières** : Les hôpitaux et autres infrastructures médicales doivent être modernisés pour résister aux événements climatiques extrêmes, tels que les inondations ou les tempêtes. Cela inclut la mise en place de systèmes de secours pour l'alimentation électrique, la protection contre les inondations et la création de zones sécurisées au sein des établissements.
- **Systèmes de climatisation efficaces** : Face à l'augmentation des vagues de chaleur, les établissements de santé doivent être équipés de systèmes de climatisation à haute efficacité énergétique. Des solutions comme les pompes à chaleur, combinées à des systèmes de ventilation naturelle, permettent de garantir des conditions de soins optimales tout en minimisant la consommation d'énergie.
- **Développement de vaccins et traitements adaptés** : La recherche sur les vaccins et les traitements pour les maladies émergentes liées au changement climatique est cruciale. Les innovations dans la biotechnologie et la pharmacologie permettent de développer des solutions médicales adaptées aux nouveaux risques sanitaires posés par le réchauffement climatique.
- **Ecologie microbienne** : Renforcer les recherches en écologie microbienne pour prévenir la prolifération des cyanobactéries et garantir la qualité des eaux potables.
- **Téléconsultation et télémedecine** : La télémedecine permet de maintenir la continuité des soins lorsque les déplacements sont difficiles à cause d'inondations ou de tempêtes. Les plateformes numériques facilitent les consultations à distance et la gestion électronique des dossiers médicaux pour une meilleure coordination des soins en situation de crise.
- **Kits de soins d'urgence et cliniques mobiles** : En cas de crise, il est crucial de garantir un accès rapide aux soins pour les populations vulnérables. Cela inclut la distribution de kits de soins d'urgence et le déploiement de cliniques mobiles pour fournir des soins de proximité.
- **Interopérabilité des systèmes de gestion des soins** : Les systèmes d'information interopérables, comme les Systèmes d'Information Géographique (SIG), sont essentiels pour surveiller en temps réel les vulnérabilités climatiques et anticiper les réponses en matière de santé publique.

4.8. Technologies pour la défense

- **Surveillance des menaces climatiques et géostratégiques par satellite** : Les systèmes de surveillance basés sur l'observation de la Terre permettent de surveiller les mouvements géopolitiques et les impacts climatiques. Ces technologies aident à prévenir les tensions liées aux catastrophes naturelles, en détectant les changements environnementaux avant qu'ils n'affectent les opérations militaires.
- **Renforcement des bases militaires côtières et terrestres** : Les infrastructures militaires doivent être renforcées pour résister à l'élévation du niveau de la mer, aux inondations et aux tempêtes. Cela inclut l'installation de systèmes de drainage avancés et l'utilisation de matériaux de construction résistants aux conditions climatiques extrêmes.
- **Systèmes de refroidissement pour les équipements militaires** : L'augmentation des températures impose une adaptation des systèmes de refroidissement pour les équipements militaires, tels que les véhicules blindés et les systèmes électroniques embarqués, qui nécessitent un maintien constant des températures de fonctionnement.
- **Protection des infrastructures critiques face aux événements extrêmes** : Les infrastructures militaires, telles que les dépôts de munitions et les centres de communication, doivent être renforcées pour résister aux tempêtes et autres phénomènes climatiques extrêmes. Cela inclut l'utilisation de technologies de protection thermique et physique.
- **Équipements adaptés aux conditions climatiques** : L'adaptation des uniformes militaires et des équipements individuels est essentielle pour permettre aux soldats de maintenir leur efficacité opérationnelle dans des environnements aux températures extrêmes. Les nouvelles technologies se concentrent sur l'amélioration de la ventilation, de l'isolation thermique, et de la protection contre l'humidité.
- **Systèmes d'énergie autonomes pour bases militaires** : Utilisation de microgrids et de systèmes de stockage d'énergie pour assurer une alimentation continue en énergie dans les bases militaires isolées ou affectées par des événements climatiques extrêmes.
- **Technologies de drones pour la surveillance en environnement extrême** : Développement de drones équipés de capteurs capables de surveiller en temps réel les zones touchées par des catastrophes naturelles ou les zones de conflit dans des environnements climatiques hostiles.
- **Prévision climatique pour les opérations militaires** : L'utilisation de modèles climatiques et de technologies de prévision permet aux forces armées d'anticiper les conditions météorologiques extrêmes dans les zones de conflit et d'adapter leurs stratégies opérationnelles. Les données

collectées par les satellites aident à surveiller les mouvements de troupes dans des contextes de tensions géopolitiques exacerbées par le changement climatique.

- **Réduction de l'empreinte carbone des opérations militaires** : Adoption de technologies visant à minimiser l'empreinte carbone des forces armées, y compris l'utilisation de carburants alternatifs et la mise en place de bases militaires plus durables et autonomes sur le plan énergétique.
- **Transport militaire résilient aux conditions extrêmes** : Développement de véhicules blindés et autres moyens de transport capables de résister aux conditions extrêmes, telles que les fortes chaleurs, les tempêtes de sable et les inondations.

4.9. Technologies pour le spatial

- **Surveillance géostratégique et observation climatique par satellite** : Les technologies spatiales, en particulier les satellites d'observation de la Terre, sont essentielles pour surveiller les impacts du changement climatique à l'échelle mondiale. Ces satellites fournissent des données précises et en temps réel sur les phénomènes climatiques extrêmes, les changements dans les écosystèmes, et la déforestation, ce qui est crucial pour la planification des réponses climatiques. Le CNES, en collaboration avec l'ESA, développe des missions satellitaires de nouvelle génération pour améliorer la précision des données climatiques et faciliter la prise de décision pour l'adaptation.
- **Systèmes de communication par satellite résilients** : Les satellites doivent être renforcés pour résister aux perturbations climatiques, garantissant ainsi des communications stables et sécurisées lors des catastrophes naturelles. Les innovations se concentrent sur la réduction des risques de défaillance.
- **Développement de satellites intelligents équipés de capteurs avancés** : Les nouveaux satellites sont équipés de capteurs qui permettent de mesurer en temps réel des données climatiques, notamment la pollution atmosphérique, la température de surface et l'intensité des tempêtes. Ces informations sont cruciales pour anticiper les impacts du changement climatique.
- **Technologies de propulsion spatiale résilientes** : Les innovations dans la propulsion spatiale se concentrent sur des systèmes plus résistants aux variations climatiques et plus économes en énergie. Ces technologies permettent d'améliorer la durée de vie et l'efficacité des missions spatiales.
- **Cartographie des risques climatiques à partir de données satellitaires** : Les satellites offrent une vue globale des risques climatiques, permettant aux gouvernements et aux industries de mieux se préparer aux catastrophes naturelles. Ces systèmes de cartographie aident à identifier les zones vulnérables.

- **Applications de l'intelligence artificielle pour les satellites** : L'IA est intégrée dans les satellites pour améliorer la capacité de traitement des données et optimiser les missions. Ces satellites intelligents peuvent anticiper et réagir rapidement aux changements climatiques et géopolitiques.

Les technologies jouent un rôle crucial dans l'adaptation au changement climatique. Ces technologies, soutenues par une recherche et un développement intensifs en France, offrent des solutions concrètes pour renforcer la résilience des infrastructures, améliorer la gestion des ressources naturelles, et protéger la santé publique face aux défis climatiques croissants. Pour maximiser l'impact de ces innovations, il est essentiel de favoriser leur adoption à grande échelle, de soutenir les collaborations entre les acteurs publics et privés, et de renforcer les mécanismes de financement pour la R&D en adaptation climatique.

Approche systémique et gouvernance



Les interactions entre secteurs sont multiples. C'est en particulier le cas de l'énergie et de l'eau, qui occupe une position centrale. L'adaptation au changement climatique ne peut être efficacement réalisée que par une approche systémique, qui intègre les interactions complexes entre différents secteurs et niveaux de gouvernance. Parmi les autres interactions on peut citer l'agriculture et la santé : le changement climatique influence la sécurité alimentaire et la santé publique, rendant essentielle l'intégration de ces secteurs. Les systèmes d'information et les formes d'organisation qui gèrent les interactions systémiques émergent également comme des éléments clés de cette transversalité, nécessitant une approche axée sur leur décarbonation et leur optimisation énergétique. L'adoption de pratiques agricoles résilientes, telles que l'agroécologie et la sélection de cultures résistantes à la sécheresse, contribue à sécuriser les approvisionnements alimentaires tout en réduisant l'usage de pesticides, limitant ainsi les risques de contamination des ressources en eau. En parallèle, l'extension des zones de répartition de maladies vectorielles, comme la dengue et le chikungunya, impose une coordination renforcée entre secteurs agricole et sanitaire pour gérer de manière proactive les vecteurs. On peut également mentionner les interactions entre l'urbanisme et les transports, où les infrastructures doivent être adaptées pour résister aux impacts climatiques, tels que les inondations et les vagues de chaleur. De plus, les politiques de densification urbaine et de développement des transports publics intégrées à la planification urbaine permettent de réduire la dépendance aux véhicules individuels et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Des investissements, comme ceux de Vinci dans des routes résilientes et dans le développement d'infrastructures de transport public, renforcent ainsi la mobilité urbaine et la résilience des villes. Enfin, des modèles locaux à maille fine sont indispensables pour prédire les risques climatiques spécifiques aux infrastructures et optimiser les plans d'adaptation. Enfin, les systèmes d'information, alimentés par des technologies numériques avancées telles que l'intelligence

artificielle et les réseaux de communication, jouent un rôle central dans la coordination des efforts systémiques. Cependant, ces systèmes eux-mêmes ont une empreinte énergétique significative, nécessitant des efforts pour leur décarbonation. Des modèles locaux à maille fine sont également indispensables pour prédire les risques climatiques spécifiques aux infrastructures et optimiser les plans d'adaptation.

5.1. Interconnexions entre les secteurs

Énergie et Eau

Les secteurs de l'énergie et de l'eau sont fortement interconnectés. Par exemple, les centrales nucléaires et thermiques dépendent de l'eau pour le refroidissement. Avec l'intensification des sécheresses et la raréfaction des ressources hydriques, il devient impératif de développer des systèmes de refroidissement économes en eau. EDF travaille activement sur l'optimisation des systèmes de refroidissement pour réduire la consommation d'eau, en particulier dans les régions vulnérables à la sécheresse. L'énergie hydrique, un autre exemple, est directement dépendante de la disponibilité de l'eau pour la production d'électricité.

Énergie et Systèmes d'Information

Les systèmes d'information, qui jouent un rôle de coordination dans tous les secteurs, nécessitent une alimentation énergétique stable et décarbonée. L'interconnexion entre énergie et systèmes d'information est primordiale pour gérer les interactions systémiques. Les smart grids, alimentés par des solutions numériques avancées, permettent non seulement d'améliorer la résilience des réseaux énergétiques, mais aussi de soutenir l'électrification des transports et l'intégration des énergies renouvelables, tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Eau et Agriculture

L'agriculture est un grand consommateur d'eau. L'irrigation dans les zones agricoles doit être gérée en tenant compte des ressources disponibles pour éviter une compétition entre les usages. Des techniques d'irrigation plus efficaces et des systèmes de gestion de l'eau sont cruciaux pour assurer que l'agriculture ne déstabilise pas l'approvisionnement en eau potable. En même temps, l'agriculture durable peut jouer un rôle dans la protection des ressources en eau à travers des pratiques comme l'agroécologie.

Eau et Santé

L'eau joue un rôle essentiel dans la santé publique, à la fois en tant que ressource essentielle, mais aussi en tant que vecteur de maladies si elle est contaminée. Le changement climatique, en augmentant la fréquence des sécheresses et la raréfaction des ressources en eau potable, accentue les enjeux sanitaires. Une gestion optimisée de l'eau est cruciale pour éviter la propagation de maladies et garantir l'accès à une eau de qualité.

Eau et Urbanisme

Les infrastructures urbaines sont aussi tributaires de la gestion des ressources en eau. La gestion des eaux pluviales, la résistance aux inondations et l'approvisionnement en eau potable sont des défis de plus en plus pressants à mesure que les villes s'agrandissent et que le climat se réchauffe. Des solutions, telles que la rétention des eaux pluviales et la végétalisation urbaine pour limiter les îlots de chaleur, peuvent contribuer à une meilleure gestion de l'eau en milieu urbain.

Outre cette position centrale de l'eau, il y a d'autres interactions, comme :

Agriculture et Santé

Le changement climatique influence la sécurité alimentaire et la santé publique, rendant l'intégration de ces secteurs essentielle. L'INRAE met en avant l'importance de développer des pratiques agricoles résilientes, telles que l'agroécologie et la sélection de cultures résistantes à la sécheresse, pour sécuriser les approvisionnements alimentaires tout en limitant les impacts sur la santé, notamment en réduisant l'usage des pesticides. Par ailleurs, l'extension des zones de répartition des maladies vectorielles, telles que la dengue et le chikungunya, nécessite une coordination étroite entre les secteurs agricoles et sanitaires pour gérer les vecteurs de manière proactive.

Urbanisme et Transport

L'urbanisme et le transport sont également interdépendants. Les infrastructures de transport doivent être adaptées pour résister aux impacts climatiques tels que les inondations et les vagues de chaleur. En parallèle, les politiques de densification urbaine et de développement des transports publics doivent être intégrées dans la planification urbaine pour réduire la dépendance aux véhicules individuels et minimiser les émissions de gaz à effet de serre.

5.2. Synergies et optimisation des ressources

- **Optimisation des investissements** : Une approche systémique permet d'optimiser les investissements en identifiant les synergies entre différents secteurs. Par exemple, les smart grids ne se contentent pas de renforcer la résilience du réseau électrique; ils permettent également d'intégrer les énergies renouvelables, de gérer la demande en électricité, et de soutenir l'électrification des transports. Ces technologies réduisent les émissions de gaz à effet de serre tout en améliorant la résilience énergétique, ce qui en fait une solution clé pour plusieurs secteurs simultanément.
- **Réduction des coûts et des impacts négatifs** : L'approche systémique permet également de réduire les coûts et d'éviter les effets de rebond ou les impacts négatifs non intentionnels. Par exemple, l'introduction de technologies d'irrigation économes en eau dans l'agriculture doit être coordonnée avec les besoins énergétiques pour éviter une augmentation de la consommation d'électricité, ce qui pourrait contrarier les efforts de réduction des émissions de GES dans le secteur de l'énergie.
- **Gestion intégrée des risques** : Une gestion intégrée des risques climatiques, qui prend en compte les interactions entre les différents secteurs, est essentielle pour garantir la résilience des infrastructures critiques. Par exemple, Enedis travaille sur l'intégration des réseaux électriques avec les infrastructures de transport et les systèmes de gestion de l'eau pour minimiser les interruptions de service et garantir une réponse efficace en cas de catastrophe naturelle. Cette intégration permet de coordonner les réponses aux crises climatiques de manière plus efficace, en optimisant l'utilisation des ressources disponibles et en minimisant les dommages collatéraux.

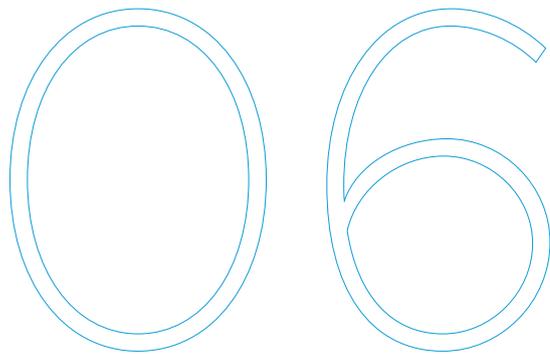
5.3. Coordination et gouvernance

- **Coordination intersectorielle** : La coordination entre les différents secteurs est essentielle pour la mise en œuvre efficace d'une approche systémique. Cette coordination doit être facilitée par des structures de gouvernance adaptées, qui encouragent la collaboration entre les ministères, les entreprises, les collectivités locales, et les institutions de recherche. Cette coordination repose également sur des systèmes d'information robustes capables de centraliser les données et de faciliter les prises de décision. Le Ministère de la Transition Écologique, en collaboration avec d'autres ministères et agences comme l'ADEME, joue un rôle central dans la coordination des efforts d'adaptation en France.

- **Coopération internationale** : Prévoir les phénomènes climatiques à l'échelle locale reste une difficulté majeure en raison des limitations actuelles des modèles. Pour surmonter ces obstacles, il est essentiel de développer et améliorer les outils de modélisation, notamment à travers l'utilisation de technologies telles que les satellites et l'intelligence artificielle. Une coopération internationale renforcée dans ce domaine est nécessaire pour assurer une meilleure précision des prévisions. Par ailleurs, ces avancées technologiques dépendent de la collaboration avec les acteurs majeurs du secteur numérique, ce qui soulève des défis liés à la gouvernance de ces outils à une échelle globale.
- **Normes et plateformes pour le partage des données intersectorielles** : Pour soutenir une approche systémique, il est nécessaire de mettre en place des plateformes de partage d'informations qui facilitent l'échange de données et de meilleures pratiques entre les secteurs. Ces plateformes permettent de mieux comprendre les interconnexions entre les différents secteurs et de développer des solutions intégrées pour l'adaptation climatique. Des initiatives comme les conférences intersectorielles et les groupes de travail transversaux contribuent à cette collaboration et à l'harmonisation des stratégies d'adaptation. Le partage de données entre secteurs et territoires est devenu plus fréquent, mais des obstacles subsistent, notamment le manque de consensus sur les normes et protocoles d'échange. Il est important de définir des normes internationales pour encadrer le partage des données et garantir une communication fluide. Sans un cadre normatif commun, comme ceux existants dans le secteur numérique, il sera difficile de mettre en place des échanges efficaces à grande échelle.

La nécessité d'une approche systémique dans l'adaptation au changement climatique est évidente pour coordonner les efforts entre les secteurs de l'eau, de l'énergie, de l'agriculture, de l'urbanisme, de la santé, de l'industrie, du transport, du spatial, et de la défense. La transversalité des systèmes d'énergie et d'information émerge également comme un axe central de l'adaptation systémique au changement climatique. Une approche coordonnée et décarbonnée est essentielle pour maximiser les stratégies d'adaptation et synergies entre les secteurs, d'optimiser les investissements au travers d'une réduction des coûts, et de réduire les risques tout en assurant une résilience durable.

Conclusion



La synthèse suivante récapitule les principaux enjeux identifiés ainsi que les solutions technologiques envisagées, en mettant l'accent sur l'importance d'une approche systémique et en soulignant les synergies positives entre adaptation et atténuation.

6.1. Enjeux et solutions, secteur par secteur

Eau :

Enjeu : D'un côté, le stress hydrique, amplifié par des périodes de sécheresse et de chaleur prolongées, menace les ressources en eau dans de nombreuses régions de France ainsi que leur qualité, avec des risques pour la santé. De l'autre, les inondations provoquées par des pluies plus intenses et concentrées mettent en danger les habitations, les infrastructures et les sols.

Solution : Il est indispensable de mettre en place une stratégie nationale de gestion des ressources en eau et de leur distribution. Cela inclut des actions telles que le stockage, la poursuite des recherches sur le dessalement de l'eau de mer, la recharge des cours d'eau et des nappes phréatiques à partir d'eaux usées correctement retraitées, l'entretien du vaste réseau de distribution et la réduction des fuites, ainsi que l'optimisation des systèmes d'irrigation. Il est également crucial d'améliorer les usages de l'eau, en éliminant les consommations inutiles et en évitant les pics de demande, notamment par des campagnes de sensibilisation visant à responsabiliser les comportements.

Pour lutter contre les inondations, il est nécessaire de continuer à renforcer les infrastructures critiques, d'équiper ces structures de capteurs pour surveiller leur état, d'améliorer les prévisions climatiques à l'échelle locale, d'accroître la fréquence des images satellitaires, et de développer des scénarios ainsi que des plans d'alerte et de secours en cas d'événements extrêmes.

Énergie et Télécommunications :

Enjeu : Ces secteurs sont particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique. Les vagues de chaleur, les tempêtes et les inondations

peuvent gravement perturber la production, et surtout la distribution de l'électricité et des informations.

Solution : Le renforcement mécanique des lignes électriques ou leur enfouissement constitue une avancée majeure pour réduire cette vulnérabilité. Une autre solution, pour le réseau électrique, réside dans la décentralisation du pilotage grâce aux smart grids, ainsi que dans la création de capacités locales de stockage.

Agriculture :

Enjeu : L'agriculture fait face à des défis majeurs liés à la sécheresse, aux inondations et aux températures extrêmes, qui menacent à la fois la sécurité alimentaire et la viabilité économique des exploitations agricoles.

Solution : Une partie des solutions réside dans une meilleure gestion de l'eau. Une autre approche combine l'utilisation agroécologique de cette ressource avec une adaptation des pratiques agricoles : développement de nouvelles variétés de cultures et mise en place de rotations permettant une exploitation continue du sol, tout en préservant et améliorant sa qualité.

Certains de ces changements pourraient rapidement être perçus comme des solutions gagnant-gagnant pour les chaînes de valeur agricoles, bien qu'elles soient encore freinées par des inerties structurelles et des contraintes réglementaires.

L'INRAE joue un rôle clé dans la recherche de ces solutions, et les avancées scientifiques en microbiologie y occupent une place de plus en plus importante.

Villes et Bâtiment :

Enjeu : Les infrastructures urbaines et les bâtiments sont de plus en plus exposés aux vagues de chaleur et aux inondations, qui menacent la santé et la sécurité des habitants tout en risquant d'endommager les infrastructures.

Solution : Une partie de la réponse réside dans la rénovation thermique. Il ne faut pas seulement se soucier de la protection contre le froid, mais aussi de la montée des températures, qui peut représenter un danger pour la santé. La ventilation est également un facteur clé à prendre en compte. Un bâtiment fonctionne comme un système, et la principale difficulté consiste à assembler judicieusement les éléments

techniques tout en coordonnant les nombreux niveaux de décision et d'exécution.

Les prescriptions, normes et aides devraient être davantage basées sur les sciences de la physique du bâtiment et des matériaux. Il serait également pertinent d'améliorer l'information pour éclairer les décisions et ajuster les comportements. Les innovations technologiques, telles que les isolants thermiques, les pompes à chaleur, le béton haute performance, et le recyclage des matériaux, peuvent jouer un rôle important.

L'urbanisme a aussi un rôle central à jouer : rendre la ville plus habitable et durable est un objectif majeur. La végétalisation urbaine peut contribuer à réduire les îlots de chaleur, même si son impact sur la température intérieure des logements est limité. Il faut également veiller aux extensions urbaines dans les zones à risques.

Industrie :

Enjeu : L'industrie est vulnérable aux événements climatiques extrêmes, qui peuvent interrompre la production, endommager les installations, perturber les chaînes d'approvisionnement et d'expédition, et accroître les coûts de maintenance. En parallèle, l'industrie a un rôle crucial à jouer en développant des produits plus résilients et plus recyclables.

Solution : Cela exige des investissements dans la protection des installations ainsi que des innovations dans les procédés et la conception de produits.

Transports :

Enjeu : Les infrastructures de transport sont vulnérables aux événements climatiques extrêmes, qui peuvent perturber la mobilité, la sécurité, la qualité des services, et entraîner des conséquences économiques importantes.

Solution : Les infrastructures françaises, qu'il s'agisse des routes, des voies ferrées ou des aéroports, sont de bonne qualité. L'enjeu principal est de renforcer leur entretien pour mieux intégrer l'augmentation des risques climatiques.

En parallèle, l'intermodalité, qui constitue une des principales évolutions – notamment avec l'essor des véhicules électriques – nécessitera une meilleure coordination et une transmission plus fluide des informations. Le développement du numérique et des réseaux intelligents jouera un rôle clé dans cette transition.

Santé :

Enjeu : Le changement climatique aggrave les risques sanitaires, en augmentant la fréquence des vagues de chaleur et en étendant la répartition géographique des maladies vectorielles, ce qui met les systèmes de santé sous pression.

Solution : Le développement de systèmes de surveillance sanitaire intégrés et d'alertes précoces est essentiel pour anticiper et répondre efficacement aux crises sanitaires liées au climat. Il est également nécessaire de moderniser les infrastructures de santé, en particulier dans les zones les plus vulnérables.

Défense :

Enjeu : Les forces armées et les infrastructures de défense sont de plus en plus exposées à des menaces liées aux conditions climatiques extrêmes, susceptibles de compromettre la préparation opérationnelle et la capacité de réaction rapide en cas de crise.

Solution : Il est essentiel de renforcer les systèmes de cyberdéfense, d'améliorer la résilience des bases militaires face aux catastrophes naturelles, et de développer des technologies de surveillance avancées (drones, satellites) pour anticiper les risques liés aux évolutions géopolitiques et climatiques. Le développement de matériaux et d'infrastructures capables de résister aux conditions extrêmes constitue également une priorité.

Spatial :

Enjeu : Le secteur spatial joue un rôle essentiel dans la surveillance des effets du changement climatique. Les images et les données fournies par les satellites sont cruciales pour les prévisions et les modèles climatiques, la visualisation des situations et des alertes, ainsi que pour le suivi de l'état des sols et des eaux.

Solution : Il est nécessaire d'obtenir des images plus précises, couvrant un éventail plus large de domaines, et idéalement en temps réel. Cela requiert le déploiement de davantage de satellites, le développement de nouveaux instruments et un renforcement de la coopération internationale.

6.2. Vue d'ensemble

Évaluation des risques et scénarios : Il est essentiel de les mettre à jour et de les améliorer au fur et à mesure que les conditions climatiques évoluent et que les connaissances scientifiques progressent. Bien que les modèles et prévisions climatiques manquent encore de certitude, de précision et de cohérence, ils s'affinent grâce à la coopération internationale, tout comme les instruments d'observation et de suivi. Ces avancées profiteront à la cartographie des zones à risque, à la gestion des risques et aux plans d'adaptation.

Approche systémique, coopération et coordination : L'adaptation au changement climatique requiert une approche systémique qui prend en compte les interdépendances entre les phénomènes physico-chimiques et les différents secteurs d'activité, tout en optimisant l'intégration des solutions technologiques. Elle doit également associer toutes les parties prenantes, y compris les citoyens, et clarifier les responsabilités. Cela implique une coordination efficace des politiques publiques, de l'échelle européenne jusqu'aux collectivités locales, un soutien renforcé à l'innovation technologique, tant publique que privée, ainsi qu'une information et une sensibilisation accrues de l'opinion publique.

Financement, prise en compte du capital existant, changements nécessaires : Quantifier les investissements nécessaires à l'adaptation reste un défi, bien que les bénéfices soient plus immédiatement perceptibles que ceux liés à l'atténuation. Dans une approche coût-bénéfices, une piste de réflexion consiste à mesurer les dommages évités, comme tentent de le faire les compagnies d'assurance. Ce défi est cependant partiellement atténué par la synergie avec les investissements réalisés dans le cadre de l'atténuation, comme c'est le cas pour les réseaux électriques. De plus, une grande partie des dépenses est déjà supportée par les opérateurs ayant une mission de service public. La France bénéficie d'infrastructures parmi les plus performantes d'Europe — chemins de fer, routes, électricité, télécommunications —, ce qui constitue un capital considérable. L'entretien et l'amélioration de ces infrastructures pourraient être intégrés dans l'effort national d'adaptation.

Les principaux changements nécessaires n'entraînent pas de dépenses majeures. Ils concernent principalement l'organisation, la coordination, l'information et l'appropriation par les acteurs. Ces enjeux sont particulièrement cruciaux dans les secteurs de l'eau, de l'agriculture, de l'urbanisme et des transports.

6.3. Besoins de R&D

L'adaptation au changement climatique nécessite des efforts significatifs en recherche et développement (R&D), combinant innovations technologiques, modélisations scientifiques et approches interdisciplinaires. Ces efforts doivent s'appuyer sur la R&D existante pour l'atténuation des effets du changement climatique, tout en ajoutant un objectif complémentaire : garantir la résilience des systèmes dans des conditions extrêmes.

Thématiques prioritaires en R&D technologique

1. Énergies et réseaux intelligents :

- Équilibrage et pilotage d'un réseau électrique décentralisé intégrant des sources intermittentes et des solutions de stockage intersaisonnier.
- Flexibilité et disponibilité des centrales nucléaires en conditions extrêmes.
- Développement des smart grids, batteries, et nouvelles technologies d'injection de sources renouvelables.
- Résilience des infrastructures énergétiques face aux perturbations et attaques (notamment en cybersécurité).

2. Électrification et procédés industriels :

- Transition vers des procédés industriels électrifiés, réduisant la dépendance à des approvisionnements énergétiques externes.

- Optimisation de l'efficacité énergétique dans les secteurs manufacturiers critiques.

3. Traitement des données et intelligence artificielle (IA) :

- Développement de grands ordinateurs, serveurs et bases de données pour la modélisation climatique.
- Simulation et traitement en urgence de grandes quantités de données liées aux événements climatiques extrêmes.

Ces axes représentent des défis stratégiques, souvent soumis à une forte concurrence internationale et à des enjeux de souveraineté.

R&D spécifique à l'adaptation

Les recherches spécifiquement dédiées à l'adaptation, bien que moins médiatisées, sont essentielles pour protéger les populations et les écosystèmes face à l'intensification des perturbations climatiques. Ces travaux se prêtent souvent à des coopérations internationales et sont cruciaux à moyen-long terme. Les priorités incluent :

1. Modélisation et observation :

- Amélioration des modèles climatiques pour une précision accrue dans le temps et l'espace.
- Développement d'instruments de mesure de l'air, de l'eau et du sol, y compris via des satellites, et traitement des données correspondantes.
- Simulation des événements extrêmes (inondations, tempêtes, vagues de chaleur) et de leurs effets sur les infrastructures et les populations.

2. Sciences biologiques et environnementales :

- Microbiologie, pour mieux comprendre les interactions entre les organismes vivants, améliorer la qualité des sols, optimiser l'agriculture et les forêts, et étudier les effets de l'environnement sur le microbiote humain.
- Étude des interactions entre l'eau, les végétaux et les bactéries, notamment en ce qui concerne la teneur bactérienne de l'eau et l'impact des températures sur sa qualité.
- Analyse des effets combinés de la chaleur et de l'humidité sur la santé humaine.

3. Construction et normes :

- Science du bâtiment, incluant la conception de structures résilientes et économes en énergie.
- Élaboration des fondements scientifiques pour l'évolution des normes et des règles de construction adaptées aux conditions climatiques futures.

4. Aspects économiques et sociologiques :

- Évaluation économique des investissements en adaptation et analyse des bénéfices à court et long terme.

- Étude des chaînes de valeur pour optimiser l'efficacité des aides publiques.
- Recherche sur l'acceptabilité sociale des changements nécessaires, la flexibilité des comportements, et l'appropriation des solutions proposées.

Importance des approches interdisciplinaires

À ces priorités technologiques s'ajoutent les sciences humaines et sociales (SHS), indispensables pour comprendre les interactions complexes entre technologies, comportements humains et cadres réglementaires. La coopération entre disciplines est essentielle pour relever les défis liés à l'appropriation des solutions d'adaptation et à la mise en œuvre efficace des stratégies climatiques.

Tableau Synoptique des Actions Prioritaires pour l'Adaptation au Changement Climatique en France

Domaine	Technologies Clés	Impact	Maturité Technique	Acceptabilité Économique et sociale
Eau	Réutilisation des eau traitées	Moyen	Moyenne	Moyenne
	Recharge des nappes phréatiques	Élevé	Moyenne	Moyenne
	Dessalement de l'eau de mer	Moyen	Moyenne	Moyenne
Énergie	Renforcement des réseaux de distribution	Élevé	Forte	Forte
	Développement des smart grids	Élevé	Moyenne	Moyenne
	Stockage de l'énergie (batteries, STEP)	Élevé	Moyenne	Moyenne
Agriculture	Sélection de variétés résistantes	Élevé	Forte	Moyenne
	Agroécologie et agroforesterie	Élevé	Moyenne	Moyenne
	Optimisation de l'irrigation et micro-irrigation	Élevé	Forte	Moyenne
Villes et Bâti-ments	Adaptation des bâtiments face à la chaleur	Élevé	Forte	Moyenne
	Gestion des eaux pluviales et inondations	Élevé	Moyenne	Moyenne
	Urbanisme résilient (îlots de fraîcheur)	Moyen	Moyenne	Forte
Santé	Développement de systèmes d'alerte pour les vagues de chaleur	Moyen	Moyenne	Moyenne
	Gestion proactive des risques sanitaires	Moyen	Moyenne	Moyenne
Industrie	Modernisation des infrastructures énergétiques	Élevé	Moyenne	Forte
	Sécurisation des chaînes d'approvisionnement	Élevé	Moyenne	Moyenne
	Résilience des outils de production	Moyen	Moyenne	Moyenne
Transport	Renforcement des infrastructures	Élevé	Moyenne	Forte
	Développement de nouvelles technologies de transport	Moyen	Moyenne	Moyenne
Défense	Résilience des bases et infrastructures	Moyen	Forte	Moyenne
	Adaptation des véhicules et équipements militaires	Moyen	Forte	Moyenne
Spatial	Surveillance satellitaire des impacts climatiques	Élevé	Forte	Forte
	Développement de capacités de relai satellite en cas de crise	Moyen	Moyenne	Moyenne

Annexes



Liste des Intervenants

Thierry Bara, Enedis

Robert Bellini, ADEME

Jean-Benoît Besset, Orange

Gustavo Boriolo, Bouygues

Yves Brechet, Saint-Gobain

Alain Burtin, EDF

Thierry Caquet, INRAE

Marie Carrega, Ministère de la Transition écologique,
de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques
DGEC

Mustapha Derras, Berger-Levrault

Marion Douteau, GRDF

Philippe Estingoy, AQC

Benoît Gufflet, Bouygues

Christian Huyghe, INRAE

François Lévêque, Mines ParisTech - CERNA

Yves Levi, Académie des Technologies

Philippe Maisongrande, CNES

Pierre Mallet, Enedis

Michael Matlosz, EuroScience

Vincent Mazauric, Schneider Electric

Sarah Mercier-Tigrine, Ministère des Armées
et des Anciens Combattants - État-Major des Armées -
Division Infrastructure et Énergie Opérationnelle - SPCD

Bertrand Minary, UIC

Emmanuel Normant, Saint-Gobain

Christian de Perthuis, Economiste

Teodora Popescu, Ministère de la Transition écologique,
de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques -
DGITM

Jean-Michel Soubeyroux, Météo-France

Emmanuel Soyeux, Veolia

Solenne Tesseron, ENGIE

Maxime Trocme, VINCI

Pierre Veltz, Ihédate

Liste des Membres Actifs du Groupe de Travail

Armand Ajdari, Arkema
Marie-Cécile Alvarez-Hérault, Grenoble INP G2Elab
José Amorero, Grand E-Nov +
Clarisse Angelier, ANRT
Olivier Appert, ANRT - GT Transition Énergétique
Dominique Auverlot, Ministère de la Transition écologique, de l'Énergie, du Climat et de la Prévention des risques - IGEDD
Cordula Barzantny, TBS Education
Étienne Beeker, France Stratégie
Nacim Belkhir, Stealth AI Startup
Antoine Belleguie, ANRT - GT Transition Énergétique
Fares Ben Othman, CAELIS
Sébastien Boyaval, École des Ponts ParisTech
Arnaud Braud, Orange Labs
Sylvain Bremond, Capenergies
François-Marie Bréon, CEA
Pierre Carlotti, Artelia
Maryse Castan, CNRS
Armelle Chabot, Université Gustave Eiffel
Gabrielle Costa de Beauregard, Alstom
Jean-Philippe Czekaj, LVMH Recherche
Louis Delvig, RAILENIUM
Dieumet Denis, Sherpa Engineering
Hervé Desvaux, CEA
Zlatina Dimitrova, ENGIE Research & Innovation
Chrystelle Dossou-Yovo, CNRS-XLIM
Remi Dreux, ENGIE Research & Innovation
Elodie du Fornel, ENGIE Research & Innovation
Jean-Baptiste Dupont, VibraTec
Laurent Duval, IFP Énergies Nouvelles
Jean-Henry Ferrasse, Aix-Marseille Université
Laurent Forti, IFP Énergies Nouvelles
Pascal Fugier, CEA
Olivier Gallet, Université de Cergy-Pontoise
Benjamin Garcia, La Poste
Jean-François Giroux, Valeo
Maëlle Goapper, NAAREA
François Guillot, SAFRAN Sagem
Matthieu Horgnies, Holcim
Marie-Pierre Jaffrézic, LNE, Laboratoire National de Métrologie et d'Essais
Frédéric Kuznik, INSA Lyon - CETHIL, Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon
Isabelle Lambert, VINCI
Richard Lavergne, ANRT - GT Transition Énergétique
Virginie Le Clezio, Onepoint
Thomas Leduc, CNRS - UMR AAU, Ambiances Architectures Urbanités
Christophe Levy, Holcim
Esther Levy, SNCF
Muriel Lightbourne, INRAE
Thibaut Limon, ADEME
Sophie Mailley, CEA
Elodie Marquina Guinois, Schlumberger
Xavier Montagne, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - DGRI
Charlotte Noël, Veolia
Emmanuel Normant, Saint-Gobain
Onur Ozen, SLB
Amaury Pachurka, Sween
Astrid Parakenings, SNCF
Michel Pascal, Mines ParisTech
Isabelle Piot-Lepetit, INRAE - UMR MOISA
Anne-Laure Popelin, Enedis
Grégoire Postel-Vinay, Académie des Technologies
Denis Randet, ANRT - GT Transition Énergétique
Catherine Renard, INRAE
Tristan Rigou-Chemin, GRDF
Sylvain Riss, BG Ingénieurs Conseils
Vincent Robin, Université de Bordeaux - URM INSPE
Nicolas Roche, EDF
Edward Romero, SerenIA
Isabelle Saint-Côme, Orange
Karine Sautereau, Centre Inffo
Abdelilah Slaoui, CNRS
Muriel Thibaut, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - DGRI
Anne-Laure Thomas Dereapas, CNRS
Guilhem Thomasset, CNRS
Bernard Tourancheau, Université Grenoble Alpes - LIG
Pierre Veltz, Ihédate
Alix Volte, CNRS
Florent Xavier, RTE
Marissa Yates, École des Ponts ParisTech
Ka Ho Yim, Institut Mines-Telecom



33, RUE RENNEQUIN - 75017 PARIS
TÉL. : 01 55 35 25 50
WWW.ANRT.ASSO.FR