

De nouvelles technologies prometteuses au service de l'adaptation au changement climatique

Olivier Appert*, Denis Randet**,
Richard Lavergne***, Antoine Belleguie****

@ 45310

Mots-clés : *adaptation, technologies, transition énergétique, changement climatique, résilience*

Pour faire face aux impacts du changement climatique et à leur intensification, le groupe de travail «Transition énergétique» de l'ANRT a mené tout au long de l'année 2024 une analyse approfondie des technologies d'adaptation dans neuf secteurs clés : eau, énergie, agriculture, villes, industrie, transport, santé, défense et spatial. Le présent article propose une synthèse de ces travaux, en identifiant les innovations les plus prometteuses, et en soulignant les interdépendances sectorielles et les leviers d'une résilience systémique.

L'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT) dispose d'un groupe de travail permanent sur la transition énergétique dont la mission est de soutenir les pouvoirs publics dans l'élaboration de la Stratégie française sur l'énergie et le climat (SFEC). Cette dernière est la feuille de route de la France pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 et assurer l'adaptation de la société aux impacts du changement climatique. Sa dernière version a été publiée le 23 avril 2020 et la suivante devrait être publiée en 2025. Elle intègre notamment la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), ainsi que le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), qui est plus particulièrement concerné par le présent article. Dans ce contexte, le groupe de travail «Transition

énergétique», présidé par Olivier Appert, Denis Randet et Richard Lavergne, avec Antoine Belleguie comme rapporteur, a réuni des experts issus de divers horizons — grandes entreprises, instituts de recherche, universités, ministères et organismes gouvernementaux — pour analyser les défis technologiques liés à l'adaptation au changement climatique [Appert *et al.*, 2024]. Ses travaux ont porté sur neuf secteurs clés : l'eau, l'énergie, l'agriculture, les villes, l'industrie, les transports, la santé, la défense et le spatial. Cet article en synthétise les conclusions, mettant en avant les technologies et innovations essentielles pour renforcer la résilience de l'économie face aux impacts climatiques. Plutôt qu'un simple inventaire, cette synthèse vise à mettre en lumière les innovations les plus structurantes, les interdépendances entre secteurs et les leviers technologiques d'une résilience systémique.

* Académie des technologies.

** Ingénieur général de l'armement.

*** Conseil général de l'économie.

**** Université Gustave Eiffel – Ponts ParisTech.

Contexte

Le changement climatique représente un défi global sans précédent, nécessitant une adaptation rapide et efficace de tous les secteurs économiques. Cet article, comme le rapport du groupe de travail précité, se concentre sur les technologies d'adaptation, tout en reconnaissant leur fréquente complémentarité avec des stratégies d'atténuation, pour renforcer la résilience des secteurs économiques face aux impacts du changement climatique.

L'approche retenue se distingue par son originalité : elle met l'accent sur le levier technologique, là où les travaux d'élaboration du PNACC se concentrent principalement sur les politiques publiques et les mesures d'adaptation. Or, les technologies peuvent jouer un rôle déterminant dans le succès de ces mesures, en améliorant leur impact et en réduisant les coûts de mise en œuvre.

1. Les neuf secteurs étudiés

Pour structurer l'analyse, le groupe de travail de l'ANRT a identifié neuf secteurs clés :

- Eau : gestion durable des ressources en eau face aux sécheresses et aux inondations.
- Énergie : adaptation des infrastructures et intégration des énergies renouvelables.
- Agriculture : innovations pour une agriculture résiliente face aux aléas climatiques.
- Villes : urbanisme durable et gestion des risques climatiques en milieu urbain.
- Industrie : résilience des processus et des installations.
- Transport : résilience des infrastructures.
- Santé : prévention et gestion des risques sanitaires liés aux événements climatiques extrêmes.

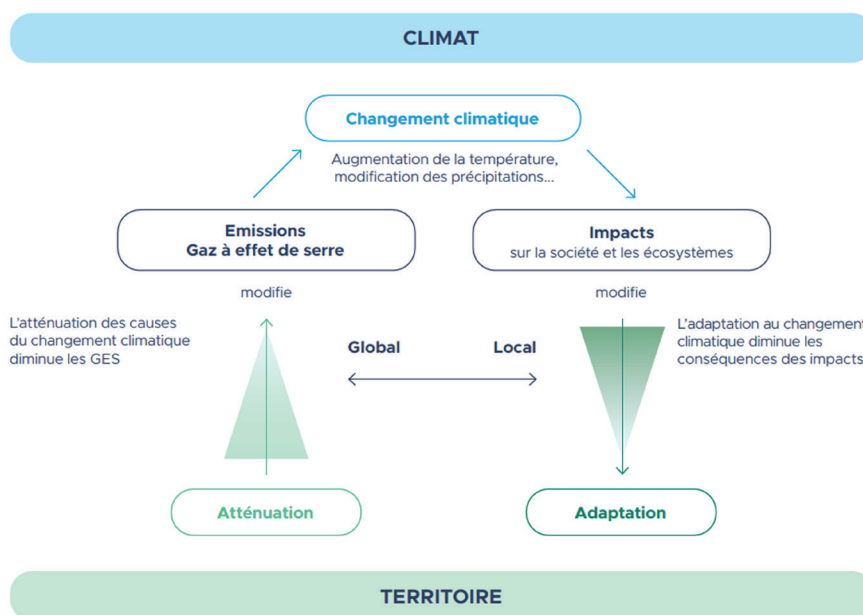


Figure 1. Enjeux et interactions entre atténuation et adaptation

Source : adapté du MTECT/ONERC (2023)

De nouvelles technologies prometteuses au service de l'adaptation au changement climatique

- Défense : maintien des capacités opérationnelles face aux menaces climatiques.
- Spatial : utilisation des technologies spatiales pour la surveillance, la compréhension, les alertes et la gestion des crises.

2. Technologies pour l'adaptation au changement climatique

Pour chaque secteur clé, des technologies ont été identifiées comme étant les plus prometteuses pour s'adapter au changement climatique en cours.

2.1. Eau

Le secteur de l'eau est confronté à des défis croissants liés aux inondations, aux sécheresses et à la concurrence pour les ressources hydriques. Ces défis touchent plusieurs autres secteurs. Les épisodes climatiques extrêmes menacent les infrastructures énergétiques, agricoles et urbaines, ainsi que la santé humaine. Les technologies suivantes visent à optimiser l'utilisation de l'eau tout en renforçant la résilience des écosystèmes et des infrastructures.

- Stockage et gestion des eaux pluviales, pour assurer un approvisionnement continu en période de sécheresse et atténuer les risques d'inondation en évitant la saturation des réseaux d'évacuation.
- Réoxygénation des plans d'eau pour lutter contre l'eutrophisation et la désoxygénation.
- Modélisation¹ des précipitations et dimensionnement des réseaux de distribution d'eau pour anticiper les événements climatiques extrêmes.
- Systèmes de détection des fuites dans les réseaux de distribution d'eau.
- Capteurs intelligents et surveillance en temps réel de la qualité de l'eau.

- Réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation agricole ou les processus industriels. Filtration avancée et procédés de désinfection pour améliorer la qualité de l'eau².
- Micro-irrigation et irrigation intelligente : utilisation de capteurs IoT (*Internet of Things*) et d'intelligence artificielle pour optimiser l'irrigation et réduire la consommation d'eau de 30 à 40 %³.
- Dessalement de l'eau de mer pour les régions côtières souffrant de pénuries d'eau (en traitant également le problème des déchets issus du dessalement).

2.2. Énergie

- Adaptation des centrales nucléaires et hydrauliques : modernisation des systèmes de refroidissement pour limiter leur vulnérabilité aux vagues de chaleur et aux sécheresses ; intégration de modèles hydrologiques avancés pour une gestion optimisée des ressources en eau.
- Stockage d'énergie : les stations hydrauliques de transfert d'énergie par pompage (STEP) et les batteries de nouvelle génération contribuent à sécuriser la fourniture d'électricité. En France, toutefois, le potentiel de création de nouvelles STEP est limité en raison des contraintes d'installation.
- Réseaux intelligents (*smart grids*) : l'optimisation des flux d'énergie grâce à des algorithmes avancés et à la flexibilité de la demande, développés pour l'intégration des renouvelables, peut aider à répondre aux perturbations provoquées par des événements climatiques.
- L'électrification des processus industriels en substitution des combustibles fossiles rend encore plus nécessaire d'assurer la stabilité de la fourniture d'électricité.

2.3. Agriculture

- Sélection de variétés résistantes au stress hydrique et aux maladies.

- Technologies d'irrigation intelligente : systèmes de micro-irrigation et capteurs IoT pour une gestion précise de l'irrigation.
- Robotique et drones agricoles : surveillance des cultures à grande échelle et optimisation de l'usage de l'eau et des intrants agricoles.
- Gestion des sols et microbiologie : la microbiologie, associée à des techniques de couvert végétal, de combinaison de cultures et de labour minimal, vise à favoriser la biodiversité microbienne, améliorer la fertilité et la qualité des sols, et prévenir leur érosion.
- Modélisation du climat et du comportement des espèces agricoles.
- Systèmes d'alerte précoce et de gestion des crises pour anticiper les événements climatiques extrêmes.
- Réforme de la chaîne de valeur agricole : réévaluation de la répartition spatiale des cultures et des usages de l'eau.

2.4. Villes

Les villes sont particulièrement vulnérables aux impacts du changement climatique, notamment les vagues de chaleur et les inondations. Une meilleure intégration des sciences de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire et de la planification systémique aiderait à concevoir des stratégies de résilience efficaces.

- Techniques d'isolation : la principale difficulté consiste à lutter contre la chaleur. Cela nécessite une approche systémique fondée sur les sciences de l'urbanisme, combinant judicieusement les matériaux, la gestion des flux de ventilation et la modélisation précise de l'utilisation des locaux.
- Pompes à chaleur : le principal avantage des pompes à chaleur est leur réversibilité : elles peuvent produire aussi bien du froid que de la chaleur. Bien que cette technologie soit

ancienne, elle conserve un potentiel significatif d'amélioration.

- Végétalisation (toits, façades, arbres et espaces verts) : la végétalisation réduit efficacement les îlots de chaleur urbains, même si son effet reste essentiellement limité à la baisse des températures extérieures.
- Réseaux intelligents : ils permettent un pilotage précis et optimisé des flux d'eau et d'énergie.
- Modélisation des effets des événements extrêmes sur les zones urbaines : cette modélisation permet d'établir des bases solides pour définir des règles, des normes, des plans d'urbanisme adaptés et des infrastructures de protection appropriées.

2.5. Industrie

- Résilience des infrastructures : techniques avancées de construction, systèmes efficaces de refroidissement et de régulation thermique, intégration de réseaux intelligents et capteurs connectés pour une surveillance en temps réel.
- Résilience des processus industriels : développement et mise en œuvre de nouvelles solutions technologiques visant à améliorer la robustesse des procédés industriels face aux événements climatiques extrêmes.
- Résilience de l'alimentation en énergie : optimisation des systèmes de stockage énergétique et recours accru à des sources d'énergie autonomes et décentralisées pour assurer une sécurité d'approvisionnement en toute circonstance.

De nouvelles technologies prometteuses au service de l'adaptation au changement climatique

2.6. Transport

- Maintenance prédictive des infrastructures : utilisation de modèles numériques avancés et intégration de capteurs connectés pour surveiller en continu l'état des infrastructures et anticiper les interventions.
- Renforcement des infrastructures routières et ferroviaires : conception et mise en œuvre de techniques renforcées pour améliorer la résistance des infrastructures aux aléas climatiques et garantir leur pérennité.
- Gestion optimisée des flux logistiques : développement de modèles numériques permettant d'optimiser les itinéraires, les stratégies de circulation et d'approvisionnement en tenant compte des prévisions météorologiques pour assurer une gestion proactive et résiliente.

2.7. Santé

- Systèmes de prévision et d'alerte précoce des vagues de chaleur : mise en place de dispositifs avancés permettant une anticipation efficace des épisodes de canicule afin de mieux protéger la population.
- Climatisation efficace et durable : développement de solutions innovantes en climatisation, avec une attention particulière à l'efficacité énergétique et à l'impact environnemental réduit.
- Surveillance renforcée des maladies vectorielles : utilisation de capteurs environnementaux et de drones pour surveiller en temps réel la propagation des vecteurs et anticiper les risques sanitaires.
- Recherche et développement de vaccins et traitements innovants : soutien accru à la recherche scientifique pour accélérer la mise au point de nouveaux vaccins et traitements contre les maladies émergentes.
- Écologie microbienne et prévention des cyanobactéries : renforcement des recherches

en écologie microbienne afin d'améliorer la compréhension des mécanismes et prévenir efficacement la prolifération des cyanobactéries nuisibles.

- Interopérabilité des systèmes de gestion des soins en situation de crise : déploiement de systèmes interconnectés assurant une gestion fluide, efficace et coordonnée des soins médicaux lors de crises sanitaires majeures.

2.8. Défense

- Surveillance par satellites et drones des menaces climatiques et géostratégiques, détection des zones touchées par des événements extrêmes.
- Anticipation des conditions météorologiques extrêmes sur les zones d'opération.
- Protection des infrastructures : renforcement des bases militaires, recherche de matériaux résistants aux conditions climatiques extrêmes, développement de technologies de protection thermique.
- Maintien des capacités opérationnelles en conditions extrêmes : adaptation des équipements individuels, correction des pertes de performance (exemple : hélicoptères en atmosphère surchauffée, détection sous-marine perturbée par les couches chaudes), maintien en température des systèmes électroniques embarqués.
- Déploiement de systèmes d'énergie autonomes.

2.9. Spatial

- Surveillance géostratégique et observation météorologique par satellites.
- Amélioration des connaissances sur l'évolution du climat, des milieux naturels et des territoires; cartographie des risques.
- Augmentation du nombre de satellites et renforcement des réseaux satellitaires pour

permettre une observation en temps réel des conditions locales et assurer la continuité de service.

- Amélioration des capteurs embarqués : capacités accrues de détection et d'imagerie.
- Optimisation du traitement des données, notamment grâce à l'intelligence artificielle, pour exploiter pleinement les informations issues de l'observation satellitaire.

3. Conclusion et recommandations

Les neuf secteurs analysés présentent chacun des défis spécifiques, pour lesquels la technologie peut offrir des leviers d'action ciblés. Toutefois, plusieurs orientations transversales se dégagent, permettant de structurer les priorités de recherche et développement, et d'orienter les actions à mener :

- La compréhension, la préservation et la restauration des capacités des écosystèmes, ainsi que l'optimisation de l'usage des ressources naturelles (eau, sols, agriculture, atmosphère).
- La digitalisation, incluant les capteurs, le traitement des données, l'automatisation et le pilotage intelligent des systèmes.
- Les technologies d'observation, de mesure, de cartographie, de détection et de surveillance, essentielles pour comprendre et anticiper les phénomènes, déclencher des alertes et gérer efficacement les crises.
- La modélisation, de plus en plus enrichie par les apports de l'intelligence artificielle, pour améliorer la compréhension et la prédiction des dynamiques complexes.
- Une approche systémique, impliquant l'ensemble des parties prenantes — citoyens compris — à toutes les échelles, du local au national. Cette approche se traduit par des pratiques telles que l'analyse systémique partagée, la co-conception, l'interopérabilité des solutions. Elle repose sur une base scientifique

solide, intégrant pleinement les sciences humaines et sociales.

L'adaptation au changement climatique nécessite une approche intégrée et systémique, en tenant compte des interactions entre les différents secteurs et les technologies. Cette approche systémique, favorisant les synergies entre secteurs comme l'eau, l'énergie et l'agriculture, est cruciale pour maximiser l'impact des technologies d'adaptation et garantir une résilience globale face au changement climatique. Les recommandations présentées dans cet article visent à encourager l'innovation et l'adoption de technologies résilientes, en soutenant la recherche et le développement, en renforçant la gouvernance et la coordination, et en mettant en place des incitations financières.

NOTES

1. Modélisation des précipitations et dimensionnement des réseaux : les modèles hydrologiques utilisés pour anticiper les précipitations et ajuster les infrastructures de gestion des eaux pluviales reposent sur des approches probabilistes et déterministes. En France, Météo-France et le SCHAPI (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) développent des outils comme SIM (Safran-Isba-Modcou) pour affiner ces projections et améliorer la résilience des réseaux urbains face aux événements extrêmes.

2. Réutilisation des eaux usées traitées (REUT) : bien que la réutilisation des eaux usées traitées soit largement développée dans des pays comme Israël ou l'Espagne, la réglementation française, encadrée par l'arrêté du 10 mars 2022, limite encore son déploiement pour des usages industriels et agricoles. Toutefois, certains projets pilotes, comme ceux menés en Occitanie et en PACA, démontrent son potentiel pour sécuriser l'approvisionnement en eau de certaines installations industrielles critiques.

3. Déclaration de Thierry Caquet, vice-président en charge de l'international à l'INRAE, formulée lors d'une séance plénière thématique du groupe de travail.

De nouvelles technologies prometteuses au service de l'adaptation au changement climatique

RÉFÉRENCE

Appert O., Randet D., Lavergne R., Belleguie A., 2024.

Les enjeux technologiques de l'adaptation au changement climatique, Groupe de travail Transition énergétique de l'ANRT, Cahiers FutuRIS, Association nationale de la recherche et de la technologie, https://www.anrt.asso.fr/sites/default/files/2024-12/ANRT-Les-enjeux-technologiques-de-ladaptation-au-changement-climatique-Nov.2024_0.pdf.

BIOGRAPHIES

Diplômé de l'École polytechnique et ingénieur des mines, **OLIVIER APPERT** a occupé des fonctions de direction dans des administrations et des entreprises, essentiellement dans le domaine de l'énergie et de la technologie, et aussi à l'AIE de 1999 à 2003. De 2003 à 2015, il a été président-directeur général de IFP Energies Nouvelles. Il a présidé le Conseil Français de l'Énergie de 2010 à 2018 et est aujourd'hui conseiller du centre énergie de l'Ifri et membre de l'Académie des technologies.

DENIS RANDET a fait la plus grande partie de sa carrière au CEA, où il a dirigé le LETI, un des principaux laboratoires mondiaux de microélectronique et microtechnologies, puis créé CEA Valorisation. Ensuite, il a dirigé l'ANRT, où il a lancé l'opération FutuRIS, afin de rassembler recherche publique et entreprises dans la construction de visions prospectives communes. Il est ingénieur général de l'armement, docteur ès sciences.

RICHARD LAVERGNE est ingénieur général honoraire du Corps des mines, X75. Depuis 2021, il est membre associé du Conseil général de l'économie (ministère de l'Économie et des Finances). Il a été conseiller à la fois du directeur général de l'énergie et du climat (DGEC) et de la commissaire générale au développement durable (CGDD) au sein du ministère de l'Écologie. Il a été directeur de l'Observatoire de l'énergie et des matières premières.

ANTOINE BELLEGUIE est chercheur en transition énergétique du transport ferroviaire et doctorant à l'Université Gustave Eiffel. De 2019 à 2025, il a été ingénieur sur le développement de la première solution hydrogène pour le fret ferroviaire, avant d'engager un doctorat portant sur l'évaluation technico-économique des alternatives décarbonées. En 2024, il a coordonné le groupe de travail «Transition énergétique» de l'ANRT et intervient dans le master Hydrogène de l'IFP School. Il est également expert pour la Fondation Solar Impulse et ambassadeur du Pacte européen pour le climat, représentant la France auprès de la Commission européenne.

À lire également dans *La Revue de l'Énergie*

- L'adaptation aux effets du changement climatique des infrastructures des systèmes électriques, *Sylvie Parey, Bruno Carlotti, Stéphane Gardey, Anthony Maire, Didier Roustan, Nicolas Vandenberghe, Etienne Brière (n° 667, juillet-août 2023)*
- Game changers pour la transition énergétique, *Olivier Appert, Félix Elephant, Richard Lavergne, Denis Randet (n° 669, novembre-décembre 2023)*

À retrouver sur www.larevuedelenergie.com.