

Livre sur les technologies vertes

Résumé

Des solutions énergétiques qui répondent aux changements climatiques



© OMPI, 2024  Attribution 4.0
International (CC BY 4.0)

La licence Creative Commons (CC) ne
s'applique pas aux images et au contenu de
la présente publication qui n'appartient pas
à l'OMPI.

Couverture : Getty Images / Jaakko Heikkilä,
Anze Furlan/psgtproductions, marvinh

Référence OMPI 1080/24-ExSum/FR;
Identifiant d'objet numérique : [10.34667/
tind.58490](#)

Résumé

Les technologies visant la réduction de la demande d'énergie offrent une solution concrète à la question du changement climatique

Lors de la COP28 en 2023, les pays se sont engagés à tripler les capacités en énergies renouvelables et à doubler les gains d'efficacité énergétique au niveau mondial d'ici à 2030, plaçant ainsi l'efficacité énergétique au premier plan des décisions politiques. Malgré une augmentation globale du financement de la lutte contre le changement climatique, les investissements relatifs à l'efficacité énergétique restent à la traîne (CPI, 2023). Il subsiste également des disparités importantes entre les pays développés et les pays en développement pour ce qui est du déploiement et de l'adoption des technologies énergétiques à faible émission de carbone. Pour combler ce fossé, il est essentiel de renforcer la coopération internationale et d'assurer un transfert de technologie efficace. Les consommateurs – et en particulier les prosummateurs – jouent un rôle de plus en plus actif dans l'adoption des énergies propres. Cela étant, des changements structurels dans les politiques et les investissements sont nécessaires pour favoriser un accès plus large et équitable aux technologies à haut rendement énergétique et à la production décentralisée d'énergie renouvelable.

Tant que la dépendance à l'égard des combustibles fossiles persistera, l'efficacité énergétique contribuera de manière concrète et universellement avantageuse à la transition énergétique. La production d'énergie renouvelable est la meilleure solution pour éliminer progressivement les combustibles fossiles. Mais elle pose également certains problèmes, tels que les conflits liés à l'utilisation des sols, les difficultés au niveau de la chaîne d'approvisionnement et la gestion des déchets. Investir dans l'efficacité énergétique et la gestion de la demande représente une stratégie efficace pour réduire la consommation d'énergie. Les technologies et pratiques en matière d'efficacité énergétique peuvent être intégrées de manière transparente à tous les niveaux, des ménages aux grandes entreprises de services publics. En outre, les mesures relatives à l'efficacité énergétique renforcent la sécurité énergétique en réduisant la dépendance à l'égard des combustibles importés et en augmentant la résilience des systèmes énergétiques face aux fluctuations de l'offre et de la demande.

Les technologies habilitantes à destination du consommateur final au cœur de l'innovation technologique en matière d'énergie propre

L'analyse des tendances en matière de brevets dans le domaine de l'énergie, si elle n'est pas nécessairement indicative de la demande du marché ou du succès commercial, offre des indications précieuses sur les progrès technologiques et les tendances de l'industrie. Les tendances récentes dans le domaine des brevets sont dominées par les technologies habilitantes telles que les batteries, l'hydrogène, les réseaux intelligents et le captage du carbone, témoignant d'une plus grande attention à l'égard des solutions à destination du consommateur final et des systèmes énergétiques décentralisés. Les innovations en matière d'énergie propre ont connu une croissance remarquable au fil du temps, avec l'énergie solaire au cœur de l'augmentation du nombre de demandes de brevet déposées dans le domaine des énergies renouvelables (OMPI, 2023). Cependant, les énergies renouvelables représentent

moins d'un cinquième de l'ensemble des innovations en matière d'énergie propre. Les transports jouent un rôle important dans les brevets relatifs aux énergies à faible émission de carbone, en particulier en ce qui concerne les véhicules électriques et les technologies de recharge. Au niveau régional, l'Europe, le Japon et les États-Unis d'Amérique ont longtemps dominé les dépôts de demandes de brevet, mais la Chine est désormais en tête dans plusieurs secteurs, soulignant un changement mondial dans le classement en matière d'innovation. Dans cette troisième édition du Livre sur les technologies vertes, nous présentons plusieurs des principales innovations en matière de technologies énergétiques dans des segments clés de la société, à savoir :

- le milieu urbain,
- les zones rurales,
- les services essentiels.

Pour une utilisation urbaine de l'énergie plus intelligente

Les villes sont les principaux centres de consommation d'énergie et ont un rôle central à jouer dans la transition énergétique. Le passage aux bus électriques et aux véhicules autonomes offre des possibilités de réduction de la consommation de carburant, même si les défis posés par les coûts initiaux élevés et le degré d'acceptation du public restent d'actualité. Les innovations dans l'efficacité énergétique des bâtiments, l'intégration des énergies renouvelables dans l'espace public et le rapport eau-énergie en milieu urbain sont également essentielles à la transition énergétique des villes. Des études de cas prometteuses – par exemple, le système de transport rapide par bus électrique du Sénégal et le projet de récupération de la chaleur résiduelle du métro de Londres – illustrent le potentiel de la technologie pour créer des environnements urbains plus durables en tenant compte des inégalités socioéconomiques.

Néanmoins, une gestion efficace de l'énergie commence dès le stade de la conception, en insistant sur la création de villes denses et piétonnes, ainsi que sur la construction de bâtiments résidentiels et commerciaux bien isolés qui tirent parti des principes de la conception passive. L'idée est de réduire la demande d'énergie en diminuant la dépendance à l'égard des carburants de transport et des technologies de chauffage et de refroidissement consommatrices d'énergie. La conception de villes économes en énergie permet de réaliser d'importantes économies sur le long terme, au niveau des coûts et de l'énergie. Les villes pionnières optimisent davantage l'utilisation de l'énergie et des combustibles à différents niveaux, grâce à des solutions numériques automatisées et interconnectées telles que les systèmes de trafic et les réverbères intelligents. Pourtant, de nombreuses villes en pleine croissance ne parviennent pas à tirer parti de cette opportunité en amont. En outre, la capacité de mettre en œuvre de telles mesures – et d'adopter des solutions permettant de gérer la demande énergétique des villes, depuis les ménages jusqu'aux secteurs d'utilisation finale – varie considérablement d'une ville à l'autre.

Optimiser l'utilisation du chauffage, de la climatisation et de l'eau pour répondre à l'augmentation de la demande

Le chauffage et la climatisation représentent la majeure partie de la consommation d'énergie des ménages. Cette situation souligne l'importance des technologies telles que les systèmes de chauffage efficaces, les capteurs solaires thermiques et les appareils intelligents. En outre, l'intégration de la gestion de l'eau et de l'énergie est essentielle, car la consommation d'eau chaude peut représenter une part importante de la consommation d'énergie des ménages. La croissance du marché des appareils économes en énergie et en eau, associée à une législation favorable et à la sensibilisation des consommateurs, offre des possibilités de réduire les dépenses et les émissions énergétiques. Si les normes minimales de performance et les labels énergétiques ont des effets avérés sur l'adoption des technologies, la couverture doit encore être étendue à tous les pays et à tous les types d'appareils.

À mesure que les communautés ont commencé à s'intéresser à la production décentralisée d'énergie, le concept de "prosommateurs", à savoir les ménages qui consomment et produisent de l'énergie, a émergé. Grâce à la technologie, ce concept permet aux particuliers de s'engager activement dans la transition énergétique dans le cadre d'initiatives collectives. Cette volonté

des consommateurs de jouer un rôle actif est également attestée par la forte croissance des dépenses des ménages en matière de solutions d'atténuation des effets du changement climatique, menée en grande partie par les dépenses consacrées aux véhicules électriques, suivies par les panneaux solaires photovoltaïques, les chauffe-eau solaires et l'amélioration de l'efficacité énergétique des logements.

Les services publics des eaux sont soumis à une pression croissante, en raison de la diminution des réserves hydriques exacerbée par le changement climatique, alors qu'elles représentent environ 4% de la consommation mondiale d'électricité. L'obsolescence des infrastructures contribue de manière significative à cette consommation énergétique. Mais les progrès technologiques, tels que les pompes efficaces, les méthodes d'aération avancées et les systèmes intelligents de gestion de l'eau, offrent des possibilités de réduire cette consommation. L'intégration de technologies numériques telles que les compteurs intelligents et l'IA gagne du terrain, y compris dans les pays du Sud. Ces technologies facilitent la surveillance en temps réel et l'optimisation de la distribution de l'eau. En outre, la possibilité de récupérer de l'énergie grâce à la digestion anaérobie et à la production de biogaz est étudiée dans les stations d'épuration des eaux usées. Les technologies émergentes telles que les piles à combustible microbiennes et les systèmes de récupération de la chaleur, ainsi que les procédés de dessalement plus efficaces sur le plan énergétique, devraient également améliorer l'efficacité dans le secteur de l'eau. Ces mesures sont d'autant plus cruciales que la demande d'eau augmente en raison des effets du changement climatique.

Les solutions axées sur les énergies renouvelables pour surmonter les contraintes énergétiques en milieu rural

Les communautés rurales et isolées sont confrontées à des défis uniques en matière d'accès à l'énergie, en raison de leur faible densité de population, de l'importance des investissements et de certaines difficultés techniques. L'extension du réseau électrique à ces zones est souvent coûteuse. Les solutions hors réseau ont jusqu'à présent reposé sur les combustibles fossiles, tandis que la consommation d'énergie par les ménages dans les zones rurales repose souvent sur des combustibles de biomasse inefficaces et sur le kérosène, qui contribuent tous deux aux émissions de gaz à effet de serre. Les progrès des technologies axées sur les énergies renouvelables, comme le solaire et l'éolien, ainsi que les innovations en matière de stockage de l'énergie et d'efficacité énergétique, sont essentiels pour résoudre ce problème.

Les mini et micro réseaux alimentés par des énergies renouvelables semblent être des solutions rentables pour les pays en développement comme pour les pays développés. Les solutions décentralisées, telles que les mini-réseaux alimentés par des énergies renouvelables et les modèles centrés sur la communauté, sont de plus en plus répandues. Les technologies de pointe telles que les cellules photovoltaïques améliorées, le stockage des batteries et les systèmes de contrôle alimentés par l'IA améliorent la gestion de l'énergie. Par ailleurs, les innovations dans le domaine des microréseaux, de l'électrification en essaim, de l'hydroélectricité à petite échelle, des technologies solaires et de la valorisation énergétique des déchets soutiennent le développement rural et la résilience climatique. Les systèmes solaires domestiques et hybrides sont efficaces pour les zones hors réseau. En outre, les technologies de cuisson propres et les solutions de valorisation énergétique des déchets offrent également la possibilité de réduire la consommation d'énergie, tout en procurant d'autres avantages importants, notamment l'amélioration de la santé et de la qualité de l'air, la réduction de la déforestation et la gestion des déchets.

Une agriculture plus verte grâce à des innovations en matière d'efficacité énergétique

L'agriculture a un impact significatif sur le changement climatique compte tenu des émissions de gaz à effet de serre, en partie dues à l'utilisation de l'énergie. Une nouvelle révolution verte devra maximiser l'utilisation des technologies déjà disponibles pour écologiser la production et nourrir une population mondiale croissante. Des innovations telles que l'agrivoltaïque (panneaux solaires combinés aux récoltes) et l'aquavoltaïque (panneaux solaires intégrés à l'aquaculture) peuvent contribuer à la fois aux mesures d'atténuation et d'adaptation, grâce

à la mise en place de panneaux destinés à la fois à l'énergie renouvelable et à la production de cultures. Les pratiques et technologies économes en énergie, telles que l'agriculture de précision, l'irrigation solaire, les machines électrifiées, les logiciels de gestion agricole et les capteurs de l'Internet des objets, permettent de réduire les émissions et de faire des économies d'eau et d'énergie. Les modèles de financement innovants, tels que le paiement à la carte, le crédit-bail et les modèles coopératifs, sont importants pour permettre aux populations rurales et aux agriculteurs d'accéder à ces technologies et de les adopter.

La transformation et le stockage après la récolte se sont révélés très énergivores. Les pertes et gaspillages alimentaires contribuent de manière significative aux émissions de gaz à effet de serre, avec environ 30% des aliments produits perdus ou gaspillés, en particulier dans les pays à revenu faible ou intermédiaire. Les innovations technologiques telles que les séchoirs solaires à haut rendement énergétique peuvent répondre à la demande d'énergie ainsi qu'aux pertes postérieures à la récolte, bien que l'accès à ces technologies soit souvent limité pour les petits exploitants agricoles. Les technologies économes en énergie pour la transformation des produits laitiers, le séchage, la transformation et le stockage des céréales, ainsi que les sources d'énergie renouvelables, peuvent atténuer la demande d'énergie. Les innovations en matière de logistique de la chaîne du froid, d'emballage et de réfrigération sont essentielles pour réduire la consommation d'énergie, enrayer les pertes de denrées alimentaires et réduire les émissions.

Il est important de noter que les technologies propres dans le domaine rural sont des outils d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de ses effets. Elles renforcent la résistance aux pannes et aux perturbations du réseau causées par les effets du changement climatique, procurent aux zones mal desservies un accès à l'électrification rurale et garantissent un approvisionnement énergétique fiable face aux défis liés au climat. Les technologies présentées ici peuvent apporter aux populations rurales un large éventail d'avantages en matière d'adaptation et de résilience, notamment la sécurité et l'indépendance énergétiques, et l'amélioration de la qualité de l'air, de la santé, des conditions économiques et de la qualité de vie.

Des consommateurs d'énergie souvent négligés

Les supermarchés, grands consommateurs d'énergie, présentent des défis et des opportunités uniques en matière d'efficacité énergétique et de développement durable. Apparus aux États-Unis d'Amérique et en Europe au début du XX^e siècle et répandus dans le monde entier, les supermarchés réalisent des économies d'échelle pour offrir des produits diversifiés, mais doivent faire face à une forte demande d'énergie pour la réfrigération, l'éclairage et le contrôle de la température. Ces exigences, associées aux déchets alimentaires et aux émissions de réfrigérants, amplifient leur impact sur l'environnement. L'intensité énergétique du secteur, en particulier dans les petites surfaces, souligne la nécessité d'adopter des technologies à haut rendement énergétique. Les progrès réalisés dans les systèmes de réfrigération au CO₂ transcritique, les systèmes CVC efficaces et automatisés, la récupération de chaleur et la production d'énergie renouvelable sur site peuvent tous réduire considérablement la consommation et les émissions d'énergie.

Les établissements de santé sont essentiels pour les soins aux patients, mais ont des effets environnementaux importants qui sont souvent négligés. Ces établissements ont également une forte intensité de consommation d'énergie en raison de leur fonctionnement 24 heures sur 24, en particulier en ce qui concerne les systèmes CVC, l'éclairage et les équipements médicaux. Ils sont en outre vulnérables aux conditions météorologiques extrêmes et aux pannes de courant, qui peuvent menacer les soins aux patients, nécessitant une infrastructure énergétique résiliente. Des initiatives mondiales telles que Healthcare Without Harm encouragent des hôpitaux plus verts grâce à des rapports volontaires sur la durabilité, à des actions coordonnées et au partage des connaissances sur les pratiques recommandées. Des systèmes efficaces de CVC, d'éclairage et d'énergie décentralisée, y compris l'énergie solaire et la production combinée de chaleur et d'électricité, sont essentiels pour réduire les émissions et renforcer la sécurité énergétique. Les technologies telles que les systèmes de ventilation adaptatifs, les congélateurs médicaux et les appareils IRM efficaces, ainsi que l'éclairage LED automatique, sont des éléments clés de ces efforts, tout comme la réduction de la consommation d'énergie en mode veille.

Les centres de données – une infrastructure essentielle à notre vie numérique – consomment beaucoup d'énergie et d'eau, ce qui suscite des inquiétudes quant à leurs effets négatifs. Si les données sont également au centre de nombreuses solutions climatiques modernes, des prévisions climatiques à l'agriculture de précision, l'impact net de l'utilisation des données sur le climat n'est pas très bien compris. La section sur les centres de données examine des solutions innovantes pour réduire leur consommation d'énergie et leurs besoins en matière de refroidissement. À mesure que la demande de données augmente, notamment avec l'essor de l'IA, les solutions telles que la production d'énergie renouvelable sur site et l'alimentation de secours à l'hydrogène vert deviennent cruciales. L'emplacement géographique des centres de données influe sur leur impact climatique, les zones riches en électricité verte et en climats frais attirant les installations d'informatique en nuage. Diverses stratégies, notamment la virtualisation, l'équilibrage de la charge et l'utilisation de matériel et de logiciels économes en énergie, améliorent l'efficacité et la résilience climatique. Par ailleurs, les innovations en matière de technologies de refroidissement – par exemple, le refroidissement par immersion et le refroidissement libre – permettent d'optimiser la gestion de la température. En outre, les systèmes de récupération de la chaleur perdue sont de plus en plus souvent envisagés pour réaffecter la chaleur excédentaire aux besoins énergétiques locaux. Les innovations technologiques mises au point pour les opérations des centres de données en particulier sont facilement disponibles, et leur adoption est essentielle pour minimiser l'impact sur le climat de l'augmentation de la consommation mondiale de données.

Messages clés

La transition énergétique concerne tout le monde

La technologie et l'innovation favorisent la démocratisation de la transition énergétique, puisqu'elles contribuent à la décentralisation de la production d'énergie, à un accroissement de la flexibilité du réseau et à la mise à disposition d'un large éventail de solutions en matière d'efficacité énergétique et de gestion de la demande pour les ménages, les communautés, les services publics, les villes et les entreprises. Les appareils économes en énergie, les thermostats intelligents et les dispositifs de l'Internet des objets donnent aux consommateurs les moyens d'optimiser l'utilisation de l'énergie, de réduire la consommation et de diminuer les coûts, rendant ainsi les pratiques durables plus accessibles. En permettant aux consommateurs et aux utilisateurs finaux de produire, stocker ou gérer activement leur propre énergie – en complément des vastes investissements consentis dans les infrastructures énergétiques – ces avancées favorisent le renforcement de l'indépendance et de la résilience énergétiques dans tous les secteurs.

Dans le domaine énergétique, les services deviennent plus importants que les matières premières

La transition énergétique marque le début d'une nouvelle ère pour la sécurité énergétique, qui s'articule autour des services énergétiques plutôt que des matières premières. Les technologies vont devenir plus importantes que les combustibles. Dans le passé, la sécurité énergétique était principalement assurée par les mesures portant sur l'offre, tandis que la gestion de la demande d'énergie était jugée moins importante. Le paysage géopolitique va évoluer vers une dépendance énergétique plus localisée, avec des pays s'appuyant principalement sur des sources régionales et diminuant leurs importations de combustibles fossiles en provenance des zones éloignées. Les connexions mondiales vont se maintenir grâce à un partage des marchés et des chaînes d'approvisionnement pour les technologies propres. L'accent va davantage être mis sur les pays en développement et leur accès aux technologies, au financement et aux connaissances en matière de propriété intellectuelle. Les systèmes centralisés céderont la place à des solutions davantage décentralisées associant les consommateurs. Les effets sur l'environnement, la durabilité et la résilience climatique – y compris la diversification des sources d'énergie – occuperont une place toujours plus importante dans la planification et l'investissement.

Avantages macroéconomiques du passage aux énergies vertes

La plupart des pays disposent de ressources renouvelables qu'ils peuvent exploiter pour assurer leur sécurité et leur indépendance énergétiques, en réduisant leurs besoins en combustibles importés et l'exposition à la volatilité des prix des combustibles fossiles. La transition énergétique offrira des possibilités aux pays en développement dont les réserves nationales de combustibles sont souvent insuffisantes et qui ont tout intérêt à maximiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. Les technologies renouvelables n'assurent peut-être pas une indépendance énergétique absolue, mais elles permettent aux pays de renforcer leur sécurité et leur résilience énergétiques en tirant parti de leurs propres ressources. Les pays qui dépendent

fortement des importations de pétrole, de gaz ou de charbon auront la possibilité de s'affranchir des systèmes et des réseaux nationaux reposant sur les combustibles fossiles. Les technologies qui améliorent l'accès à l'énergie dans les pays en développement (par exemple, les ressources énergétiques hors réseau, hybrides et décentralisées) peuvent souvent être plus rentables que les combustibles fossiles sur le long terme. Les pays peuvent économiser environ 156 milliards de dollars É.-U. en utilisant des sources d'énergie renouvelables (IRENA, 2022). Le coût initial d'un système solaire domestique est souvent inférieur à l'investissement nécessaire pour un système alimenté par des énergies fossiles ou pour l'extension d'une infrastructure de réseau traditionnelle. En outre, les systèmes locaux et décentralisés tels que les systèmes d'énergie solaire et les microréseaux peuvent être déployés plus rapidement que les infrastructures centralisées reposant sur des combustibles fossiles, et peuvent en outre mieux résister aux perturbations et aux catastrophes naturelles. Les technologies peuvent être adaptées aux ressources locales (par exemple, l'hydroélectricité à petite échelle dans les zones fluviales), pour une plus grande efficacité et une durabilité accrue. Les gouvernements et les organisations internationales peuvent abandonner les subventions aux combustibles fossiles au profit de subventions, d'aides ou d'incitations en faveur des projets d'énergie renouvelable, réduisant ainsi leur fardeau financier. Le déploiement et l'entretien des technologies reposant sur des énergies renouvelables peuvent créer des emplois locaux, favoriser l'esprit d'entreprise au niveau local et stimuler le développement des petites et moyennes entreprises.

La décentralisation de la production favorise également un accès plus souple et plus diversifié à l'énergie

L'infrastructure décentralisée est une option de plus en plus attrayante pour l'électrification des zones rurales hors réseau. Elle peut contribuer à atteindre les objectifs d'atténuation des effets du changement climatique et d'adaptation à ce changement, donner accès à une énergie propre et fiable dans les zones mal desservies et répondre à la préférence croissante des économies émergentes et développées pour la diversité et l'indépendance énergétiques. Les systèmes d'électrification hors réseau sont disponibles grâce à différentes technologies et conceptions, ce qui accroît leur flexibilité et leur adaptabilité aux conditions locales. Les réseaux intelligents utilisent des technologies numériques, des capteurs et des compteurs intelligents pour surveiller les flux d'électricité. Ils suivent les habitudes d'utilisation, ajustent la charge du réseau en fonction de la demande et réduisent les pertes d'énergie en détectant et en corrigeant rapidement les inefficacités du réseau. Ils facilitent l'intégration des sources d'énergie décentralisées en gérant les variations de la production et en assurant la coordination avec les autres ressources du réseau. Cette approche est essentielle pour améliorer la résistance du réseau aux perturbations et aux phénomènes météorologiques extrêmes, et contribue ainsi à l'adaptation au changement climatique. Les microréseaux, qui peuvent fonctionner indépendamment du réseau principal, sont essentiels à la transition énergétique dans les communautés rurales, car ils stimulent l'adoption des énergies renouvelables tout en assurant la sécurité énergétique, l'accessibilité financière et la résilience.

De nouvelles solutions de stockage de l'énergie, efficaces et moins chères, contribuent à la généralisation des énergies renouvelables

Avec l'augmentation de l'utilisation des sources d'énergie renouvelable décentralisées, l'équilibrage de la production d'énergie intermittente devient crucial pour le stockage de l'énergie excédentaire. Le coût des batteries modernes lithium-ion a considérablement baissé ces dernières années, avec une densité énergétique améliorée, une durée de vie plus longue et une plus grande efficacité. Les innovations en matière de technologies de stockage de l'énergie se sont multipliées, notamment les batteries à flux, le pompage hydroélectrique, le stockage par volant d'inertie et le stockage par gravité exploitant l'énergie potentielle gravitationnelle, qui est particulièrement utile dans les zones rurales et hors réseau. Le stockage de l'énergie doit néanmoins encore se développer pour respecter l'engagement pris lors de la COP28 de tripler les capacités mondiales en énergie renouvelable d'ici à 2030 tout en maintenant la sécurité électrique.

La demande alimentaire mondiale devra à l'avenir être satisfaite par de nouvelles solutions vertes, et non par le maintien du statu quo

Les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique sont toutes deux essentielles pour nourrir durablement une population croissante. Paradoxalement, les innovations passées, visant à améliorer la productivité agricole, ont contribué à la dégradation des sols, à la perte de biodiversité, à la pollution de l'eau et aux émissions de gaz à effet de serre. Au cours de la première révolution verte, les machines ont augmenté la productivité et entraîné une hausse exponentielle de la production d'engrais et de pesticides, qui se poursuit encore aujourd'hui. Mais une nouvelle révolution verte est en cours, avec de nombreuses technologies actuellement disponibles qui améliorent la durabilité des opérations agricoles, tant au niveau de l'exploitation que de la transformation et du stockage après récolte. Les innovations dans les exploitations agricoles comprennent les machines agricoles électriques, les pompes et incubateurs solaires, la ventilation à haut rendement énergétique pour le bétail et les serres, l'aération alimentée par des énergies renouvelables dans l'aquaculture, et les systèmes agrivoltaiques produisant à la fois de l'énergie renouvelable et des denrées alimentaires. Les technologies de séchage consomment moins d'énergie grâce au réglage du débit d'air et à l'utilisation de capteurs d'humidité. Les innovations en matière de stockage en chambre froide utilisent l'énergie solaire, des unités de transport électrique, des technologies de réfrigération avancées à haut rendement énergétique, des systèmes de surveillance et de contrôle intelligents et de nouveaux fluides frigorigènes ayant moins d'effets sur le climat.

L'efficacité énergétique et la gestion de la demande sont essentielles pour ralentir la tendance à l'augmentation de la consommation d'énergie

L'investissement dans l'efficacité énergétique est essentiel pour la transition énergétique. Si l'efficacité énergétique et les technologies énergétiques à faible émission de carbone font l'objet de très nombreux dépôts de demandes de brevet dans les pays à revenu élevé, ces domaines restent largement sous-financés par les fonds internationaux en faveur du climat. Et si les investissements dans les énergies renouvelables sont essentiels, leur taux de pénétration actuel est insuffisant pour lutter efficacement contre le changement climatique à l'échelle mondiale. La dépendance persistante à l'égard des combustibles fossiles, associée à des subventions nationales toujours présentes et à la croissance rapide de la demande mondiale d'énergie, souligne le besoin urgent de politiques novatrices et de technologies innovantes qui réduisent la consommation d'énergie, augmentent les possibilités de récupération et introduisent de nouveaux modes d'utilisation des appareils et des produits. Le fait de privilégier les solutions axées sur l'offre en négligeant l'efficacité énergétique pourrait entraîner des difficultés plus profondes, notamment la nécessité de pérenniser les chaînes d'approvisionnement en matières premières et d'atténuer les appropriations de terrains qui exacerbent les inégalités sociales.

Attention aux effets de ricochet et aux inconvénients potentiels des investissements dans les technologies à faible émission de carbone

Comme nous l'avons vu dans les précédents chapitres, les investissements dans les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et la gestion de la demande peuvent avoir des conséquences négatives et des effets de ricochet inattendus. Parmi les exemples, citons le télétravail, qui peut réduire les déplacements mais augmente également la consommation d'énergie à domicile; les véhicules électriques et les solutions de mobilité tout-en-un, qui risquent de remplacer les transports publics et de modifier les modèles de déplacement à vélo; et les réverbères LED, qui perturbent la faune urbaine. L'effet de ricochet des investissements dans le domaine de l'efficacité énergétique est mieux connu, dans la mesure où les économies réalisées incitent les consommateurs à utiliser davantage d'énergie. En outre, il existe un risque que les investissements et les politiques en matière d'énergie décentralisée, qui visent à accroître le nombre de "prosommateurs" d'énergie renouvelable, soient encouragés au détriment du renforcement du réseau national et de sa transformation en un réseau plus écologique. Ces concessions doivent être mieux étudiées et comprises afin d'atténuer les

dommages et d'éviter de réduire les gains attendus des investissements dans les énergies à faible émission de carbone.

Le risque de voir disparaître des actifs ne se limite pas aux infrastructures utilisant des combustibles fossiles

Le risque de disparition d'une nouvelle forme d'actif énergétique est bien réel. Il est possible que des progrès technologiques rapides rendent obsolètes certaines énergies renouvelables ou infrastructures existantes. Tout comme les véhicules conventionnels et les bâtiments à faible rendement énergétique, les panneaux solaires de la première génération deviendront obsolètes. Les anciennes éoliennes, moins efficaces, de plus faible capacité et dotées de systèmes de contrôle moins avancés, peuvent être remplacées par des modèles plus récents offrant une plus grande capacité, de meilleures performances et des pales plus modernes. Les anciens systèmes de stockage par batterie peuvent être rendus obsolètes par les nouvelles technologies, telles que les batteries lithium-ion ou les batteries à semi-conducteurs, qui présentent une meilleure densité énergétique, une durée de vie plus longue et une vitesse de charge supérieure. Il peut en découler une production excessive de déchets, une augmentation des coûts d'installation et de rénovation, et une diminution de la valeur des investissements dans les énergies renouvelables au fil du temps, qui entraîne à son tour un remplacement prématuré. Si les déchets issus des énergies renouvelables ne devraient représenter, à l'avenir, qu'une petite fraction de la totalité des déchets mondiaux (par rapport aux déchets plastiques, aux déchets municipaux, aux cendres de charbon et aux déchets électroniques), il est impératif de mener des recherches et d'investir dans des programmes avancés de réutilisation et de recyclage, ainsi que dans des solutions circulaires pour les modules photovoltaïques. Cette situation met également en évidence le rôle de la rénovation. Au lieu de fabriquer des biens entièrement nouveaux, la rénovation pourrait être exploitée davantage – pour les bâtiments, les véhicules et l'industrie. La rénovation permet non seulement d'économiser de l'énergie et des matériaux, mais aussi de créer de nouveaux emplois, d'améliorer la productivité des employés et d'augmenter la valeur des actifs.

Des technologies innovantes pour de nouvelles solutions énergétiques dans des conditions difficiles

Les progrès récents des technologies de production d'énergie à faible émission de carbone élargissent leur champ d'application dans le monde entier, même dans les climats extrêmes. Les innovations dans le domaine des batteries de véhicules électriques, par exemple, peuvent favoriser la création de systèmes avancés de chauffage et de refroidissement, une meilleure gestion thermique et une nouvelle chimie des batteries permettant aux bus électriques de fonctionner dans les régions septentrionales. Les panneaux solaires sont désormais conçus pour être plus efficaces dans des conditions de faible luminosité. Les nouvelles solutions de chargement des batteries permettent également de recharger les véhicules dans les centres urbains dont le réseau électrique est insuffisant. En outre, les systèmes de refroidissement au CO₂ fonctionnant en cycle subcritique, qui ont contribué aux économies d'énergie dans les supermarchés européens, peuvent désormais fonctionner efficacement dans des climats plus chauds grâce à une conception améliorée. Par ailleurs, les pompes à chaleur – traditionnellement plus efficaces dans les climats tempérés – ont également connu des améliorations significatives, et proposent désormais chauffage ou refroidissement pendant les hivers rigoureux et les étés chauds. Ces innovations marquent des étapes importantes dans la transition énergétique mondiale, permettant l'adoption généralisée de solutions partout dans le monde. Les technologies modulaires offrent une souplesse et une accessibilité accrues aux ménages. Ces systèmes comprennent notamment les digesteurs anaérobies modulaires à usage domestique et les systèmes solaires domestiques pico (très petits) qui peuvent être installés dans de petites unités modulables, facilitant la mise en place d'un système au fil du temps. Ces innovations sont le fruit d'écosystèmes d'innovation efficaces. Les droits de propriété intellectuelle sont la pierre angulaire d'un écosystème d'innovation fonctionnel, et permettent le transfert de technologie non seulement du laboratoire au marché, mais aussi entre les marchés.

Les modèles de financement innovants favorisent l'adoption de technologies énergétiques dans les zones à faibles revenus

Les modèles de financement innovants, tels que le paiement à la carte (PAYG), l'énergie en tant que service (EaaS), les microréseaux en tant que services et les logiciels en tant que services, transforment l'accès en rendant les technologies propres plus abordables et plus accessibles dans les zones mal desservies. Ils réduisent le capital initial nécessaire à l'adoption des technologies propres. Les modèles de paiement à la carte permettent aux utilisateurs de payer par petites tranches, ce qui réduit les obstacles financiers et permet un déploiement plus rapide de ces technologies dans les différentes régions. Ils incluent souvent des garanties de performance et des services d'entretien, limitant ainsi le risque financier pour les consommateurs. De même, le crédit-bail et les accords de coopération pour les équipements agricoles économes en énergie offrent aux agriculteurs des solutions souples et rentables, leur permettant d'adopter des technologies avancées sans avoir à supporter la charge d'un gros investissement initial. Les programmes innovants proposent de plus en plus de subventions, de remises, d'incitations et de financements à faible coût afin que les producteurs agricoles et les petites entreprises rurales puissent installer des systèmes d'énergie renouvelable et améliorer leur efficacité énergétique.

Le potentiel inexploité de la valorisation énergétique

L'innovation permet de produire de l'énergie à partir de sources jusqu'ici négligées. De plus en plus d'entreprises de gestion des déchets cherchent à utiliser les matières organiques à travers la digestion anaérobie, la production combinée de chaleur et d'électricité (PCCE) et d'autres moyens de production d'énergie sur site, comme la technologie émergente des piles microbiennes. Dans les villes, des expériences sont en cours sur l'utilisation de l'énergie cinétique pour valoriser l'énergie du trafic piétonnier, ou de lignes d'absorption plates pour absorber la chaleur urbaine. Dans les zones rurales, l'utilisation de digesteurs anaérobies compacts et modulaires conçus pour les exploitations agricoles et les communautés de petite taille gagne du terrain, non seulement pour produire de l'énergie renouvelable, mais aussi pour contribuer à la gestion des déchets. Il existe également des exemples réussis de supermarchés qui se sont transformés en fournisseurs d'énergie en récupérant la chaleur générée par la réfrigération des vitrines et des congélateurs.

Davantage d'innovation pour les secteurs émergents consommateurs d'énergie

L'apparition de grands secteurs émergents crée de nouvelles incertitudes quant à la consommation énergétique future, et l'innovation doit être orientée vers la prise en considération de cette consommation d'énergie. L'électrification des utilisations finales transformera les modèles de consommation d'énergie. Les défis techniques, les coûts et les aspects environnementaux et sociaux de la modernisation des infrastructures doivent être considérés dès le départ. Ainsi, les centres de données, qui pourraient voir leur demande d'électricité doubler d'ici à 2026, comptent parmi les secteurs couverts par la présente publication. De même, le dessalement devrait être la principale cause d'augmentation de la consommation d'énergie dans le secteur de l'eau, puisque le changement climatique limite toujours plus l'accès à l'eau douce. Les systèmes de réfrigération électrique utilisés dans les véhicules de transport pour refroidir ou congeler les cargaisons sont très demandés sur une chaîne d'approvisionnement mondiale en pleine expansion. Il faudra aussi déployer des efforts supplémentaires considérables pour attirer les investissements dans les énergies renouvelables et l'expansion du réseau dans les pays moins riches, où certains domaines sont à la traîne en raison de l'insuffisance des investissements et du manque de subventions internationales.

Les technologies énergétiques propres sont également importantes pour favoriser l'adaptation et la résilience

Les technologies liées aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique protègent les systèmes de production d'énergie contre les effets concrets du changement climatique.

Cela se fait de plusieurs manières. Ces technologies intègrent différentes sources d'énergie renouvelable et, ainsi, améliorent la résilience du réseau, augmentent ses possibilités d'adaptation et offrent davantage de solutions pour gérer les phénomènes météorologiques extrêmes. Elles peuvent également réduire la dépendance à l'égard des infrastructures vulnérables. Les technologies de réseau intelligent et les systèmes de stockage de l'énergie améliorent la capacité du réseau de gérer les perturbations et d'y répondre. Investir dans les énergies renouvelables peut stimuler les économies locales et créer des emplois, ce qui accroît encore la résilience des populations locales face aux perturbations climatiques. L'agrivoltaïque optimise l'utilisation des terres, de manière à produire à la fois de l'énergie et des récoltes. Cela est particulièrement important dans les régions où les terres agricoles sont menacées par les effets du climat et l'urbanisation. L'aquavoltaïque, c'est-à-dire l'intégration de systèmes solaires photovoltaïques dans les plans d'eau, profite aux communautés de pêcheurs et d'aquaculteurs isolés et hors réseau qui luttent contre les coûts élevés du carburant tout en répondant aux besoins en matière de sécurité alimentaire.

L'énergie est au centre de la troisième édition du *Livre sur les technologies vertes*. La présente synthèse décrit le contexte dans lequel s'articulent les solutions au changement climatique exposées dans le rapport complet, qui présente toute une série d'innovations majeures en matière de technologies énergétiques dans des secteurs clés de la société, notamment les ménages et les communautés des zones urbaines et rurales, ainsi que les services essentiels fournis par les supermarchés, les établissements de santé et les centres de traitement de données.