

# PANORAMA DES INNOVATIONS POUR UN AVENIR ALIMENTÉ PAR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES : SOLUTIONS POUR INTÉGRER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES VARIABLES



**Copyright © IRENA 2019**

Sauf indication contraire, le contenu de la présente publication peut être librement utilisé, partagé, copié, reproduit, imprimé et/ou stocké, à condition de mentionner l'IRENA comme étant la source et le propriétaire des droits d'auteur. Les éléments de la présente publication attribués à des tiers pouvant faire l'objet de conditions d'utilisation distinctes, il peut être nécessaire d'obtenir les autorisations correspondantes de ces tiers avant d'utiliser ces éléments.

**Citation :** IRENA (2019), *Panorama des innovations pour un avenir alimenté par les énergies renouvelables : solutions pour intégrer les énergies renouvelables variables. Résumé à l'attention des décideurs politiques.* Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), Abou Dhabi.

**Avis de non-responsabilité**

La présente publication et les éléments qu'elle contient sont fournis « en l'état ». Toutes les précautions raisonnables ont été prises par l'IRENA afin de vérifier la fiabilité du contenu de cette publication. Néanmoins, ni l'IRENA ni aucun de ses fonctionnaires, agents, fournisseurs de contenu tiers ou de données ne peuvent fournir de garantie de quelque nature que ce soit, exprimée ou implicite. Ils déclinent donc toute responsabilité quant aux conséquences découlant de l'utilisation de cette publication ou de son contenu. Les informations contenues dans le présent document ne reflètent pas nécessairement les positions des membres de l'IRENA. La mention d'entreprises spécifiques ou de projets ou produits particuliers ne signifie pas qu'ils sont approuvés ou recommandés par l'IRENA au détriment d'autres éléments de nature similaire qui ne sont pas mentionnés. Les appellations employées dans la présente publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'IRENA, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites territoriales.

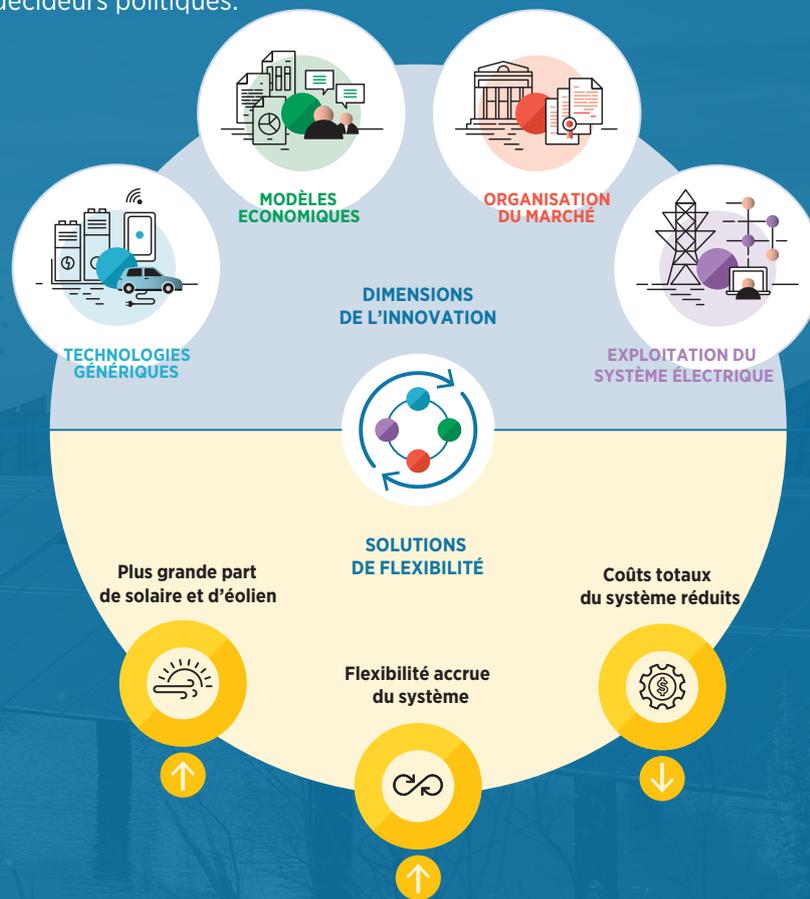
Les photos proviennent de Shutterstock.



## À PROPOS DE CE RÉSUMÉ

La publication de l'IRENA, intitulée « Panorama des innovations pour un avenir alimenté par les énergies renouvelables : solutions pour intégrer les énergies renouvelables variables » rassemble des idées clés concernant les innovations émergentes qui favorisent l'intégration d'une plus grande proportion d'énergies renouvelables variables (ERV) dans le secteur de l'électricité. En pratique, les solutions visant à intégrer les ERV résultent des synergies entre différentes innovations appliquées à travers différentes dimensions d'innovation. Le rapport analyse les innovations les plus importantes et établit des liens entre elles, offrant des solutions pratiques pour l'intégration des ERV dans différents contextes.

Ce résumé à l'attention des décideurs politiques met en avant les conclusions du rapport, qui se concentrent sur la flexibilité du système électrique, principal catalyseur de l'intégration des énergies renouvelables. Ce résumé présente les trente innovations en matière de technologies génériques (technologies qui jouent un rôle clé dans l'intégration des énergies renouvelables dans le système électrique), de organisation du marché de l'électricité (nouvelles conditions de marché et changement du cadre réglementaire, pour encourager la flexibilité et valoriser les services nécessaires dans un système électrique basé sur les énergies renouvelables), de modèles économiques (« business model ») et d'exploitation du système électrique identifiées dans l'étude, qui transforment le secteur de l'électricité en accordant une place fondamentale aux ERV. Ce document introduit aussi les solutions obtenues en matière d'intégration des ERV, ainsi qu'une analyse coûts-avantages. Un plan d'innovation en huit étapes pour réaliser un futur alimenté en énergies renouvelables résume les recommandations principales aux décideurs politiques.



**La transformation du secteur de l'électricité  
nécessite des innovations  
dans l'ensemble du secteur**



L'innovation est le moteur de la transformation du système énergétique mondial. De plus, le rythme de développement et de l'introduction de technologies plus efficaces en matière d'énergies renouvelables s'accélère à travers le monde entier. Les énergies renouvelables deviennent une option incontournable pour de nombreux pays souhaitant opérer une transition vers un approvisionnement sûr, offrant un bon rapport coût/efficacité et une viabilité sur le plan environnemental. Elles renforcent le développement socio-économique continu grâce à la création d'emplois et de valeur ajoutée au niveau local, tout en luttant contre le changement climatique et la pollution de l'air.

Jusqu'à présent, le secteur de l'électricité a ouvert la voie, avec une diminution rapide du coût des technologies liées à la production et l'exploitation de l'énergie solaire et éolienne, ce qui a permis leur adoption généralisée dans de nombreux pays. Malgré des progrès encourageants constatés à ce jour, la transition énergétique doit encore considérablement accélérer son rythme. De la même manière que pour les politiques du marché de l'électricité, les

politiques mises en place afin de stimuler l'innovation technologique doivent être sans cesse réexaminées et mises à jour afin de suivre les derniers développements et évolutions (IRENA, IEA et REN21, 2018).

L'intégration des ERV présente des enjeux spécifiques tandis que la production de l'électricité à partir de ces sources augmente. En somme, maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande devient de plus en plus difficile. Des systèmes électriques plus flexibles et intégrés sont nécessaires afin de maximiser la valeur des ERV à bas coût, c'est-à-dire l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne.

En réponse à cela, les décideurs politiques et les gestionnaires de systèmes électriques du monde entier adoptent diverses mesures afin de maintenir un équilibre fiable et à bas coût entre l'offre et la demande dans ce paysage en transformation. L'innovation vise principalement à encourager le développement et le déploiement de solutions accroissant la flexibilité du système nécessaire à l'intégration d'une grande part d'électricité solaire et éolienne.

**Flexibilité** : capacité d'un système électrique à supporter la variabilité et l'intermittence que l'énergie solaire et éolienne introduit à des échelles de temps différentes, du très court au très long terme, en évitant la déconnexion de ces sources d'énergie renouvelables et en fournissant de manière fiable l'énergie requise par les clients (IRENA, 2018a).

**Variabilité** : nature fluctuante des ressources solaires et éoliennes, qui peut se traduire par des changements rapides dans la production d'électricité.

**Intermittence** : incapacité à prédire parfaitement la production fournie par les sources d'énergie solaire et éolienne.



Ces dernières années, partout dans le monde, des gouvernements clairvoyants et entreprises pionnières ont créé, testé et déployé une multitude de solutions innovantes qui offrent la possibilité de transformer radicalement les systèmes électriques du monde entier. La grande diversité des solutions, à laquelle s'ajoute des différences entre les systèmes électriques locaux, est susceptible de déconcerter les décideurs politiques, qui peuvent rencontrer des difficultés à identifier et déterminer les solutions les plus adaptées à chaque pays ou contexte.

L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) a effectué une analyse approfondie du panorama des innovations pour

l'intégration des énergies renouvelables variables, en cartographiant et catégorisant les nombreux exemples d'innovations et de solutions innovantes. Ce rapport, combiné avec diverses ressources disponibles en ligne, vise à offrir aux décideurs politiques un guide clair, facile à parcourir et permettant d'appréhender la diversité des innovations en cours de développement, ou dans certains cas déjà déployées dans divers contextes à travers le monde. Ces innovations sont associées au sein d'une large gamme de systèmes électriques. Le cadre qui en résulte devrait permettre une prise de décisions plus éclairée à l'égard des solutions adaptées à chaque cas particulier.

---

Ce résumé est structuré de la manière suivante :

- I La transformation du secteur de l'électricité nécessite l'intégration des énergies renouvelables variables
- II Les tendances en matière d'électrification, de décentralisation et de numérisation modifient le paradigme du secteur de l'électricité
- III Le Panorama des innovations pour un avenir alimenté par les énergies renouvelables couvre les technologies génériques, l'organisation du marché, les modèles économiques et l'exploitation du système électrique
- IV Les innovations peuvent améliorer la flexibilité du système électrique
- V Les solutions sur mesure sont assemblées à l'aide d'innovations qui constituent leur base
- VI Évaluation de l'impact de la mise en œuvre de solutions en matière de flexibilité
- VII Innovations réduisant les coûts du système et maximisant les avantages
- VIII Le plan d'innovation en huit étapes pour la transformation du secteur de l'électricité.

# I. LA TRANSFORMATION DU SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ NÉCESSITE L'INTÉGRATION DES ÉNERGIES RENOUVELABLES VARIABLES

Le monde s'est engagé dans un processus de transformation vers un avenir énergétique plus inclusif, sûr, rentable, sobre en carbone et durable. Les énergies renouvelables représentent un élément constitutif essentiels à cette transformation représente l'énergie renouvelable. Cette transformation est encouragée par un intérêt sans précédent de la part du public, suivi d'une action politique visant à traiter les questions liées au développement durable et au changement climatique dans le monde, comme en témoignent les objectifs de développement durable de l'ONU et l'Accord de Paris sur le climat.

**Le secteur de l'électricité mène la transition énergétique en cours**, guidé par les politiques relatives à l'environnement et à la santé et par la diminution rapide des coûts liés à la production d'électricité renouvelable, notamment la production d'électricité solaire photovoltaïque et éolienne. Le coût de l'électricité solaire photovoltaïque a diminué de près de 75% entre 2009 et 2018, et le coût de l'électricité éolienne terrestre a été réduit de près de 25% au cours de la même période (IRENA, 2018b).

Les énergies renouvelables ont représenté environ un quart de la production d'électricité totale dans le monde en 2017 (IRENA, 2017a), avec une croissance impressionnante en matière de déploiement des technologies éoliennes et solaires photovoltaïques. À la fin de l'année 2017, la capacité installée des énergies renouvelables a atteint 2 337 gigawatts (GW), soit 34% de la capacité totale installée de production d'électricité (IEA, 2018). Les principales énergies renouvelables étaient l'hydroélectricité (54%), l'éolien (22%) et le solaire photovoltaïque (17%). La part de l'éolien et du solaire photovoltaïque devrait continuer à augmenter à un rythme soutenu dans les années à venir (IRENA, 2018c). Dans certains pays, l'intégration de l'énergie éolienne et solaire photovoltaïque est déjà bien plus élevée que la moyenne mondiale.

Le Danemark et l'Irlande, par exemple, sont des leaders en matière d'intégration de l'énergie éolienne, avec des parts d'électricité éolienne s'élevant respectivement à 44% et 27%, et un taux de pénétration instantané maximal dépassant respectivement 150% et 60% de la demande (RTE, 2018, EirGrid et SONI, 2018).

Néanmoins, la transition énergétique doit encore accélérer sa croissance. Selon l'analyse de l'IRENA, la décarbonisation du secteur de l'électricité, conformément aux objectifs pour le climat établis par l'Accord de Paris, nécessiterait que les énergies renouvelables représentent 85% de la production totale d'électricité d'ici à 2050 (Figure S1) (IRENA, 2018c). Par ailleurs, la proportion d'électricité au sein de la demande totale en énergie des secteurs d'utilisation finale (industrie, transport, bâtiment) doit augmenter de 20% en 2015 à plus de 50% en 2050.

**Dans un scénario compatible avec l'Accord de Paris, les technologies ERV, notamment le solaire photovoltaïque et l'électricité éolienne, jouent un rôle central dans la transition énergétique.**

La capacité installée des ERV est en tête, elle devrait passer de 900 GW aujourd'hui à 13 000 GW en 2050, soit 60% de la production totale d'électricité. Cela nécessite de tripler les ajouts de capacité éolienne annuelle et de doubler les ajouts de capacité solaire photovoltaïque par rapport aux niveaux de 2017.

---

*L'innovation est essentielle pour stimuler l'intégration des ERV et encourager la transformation globale du secteur énergétique*

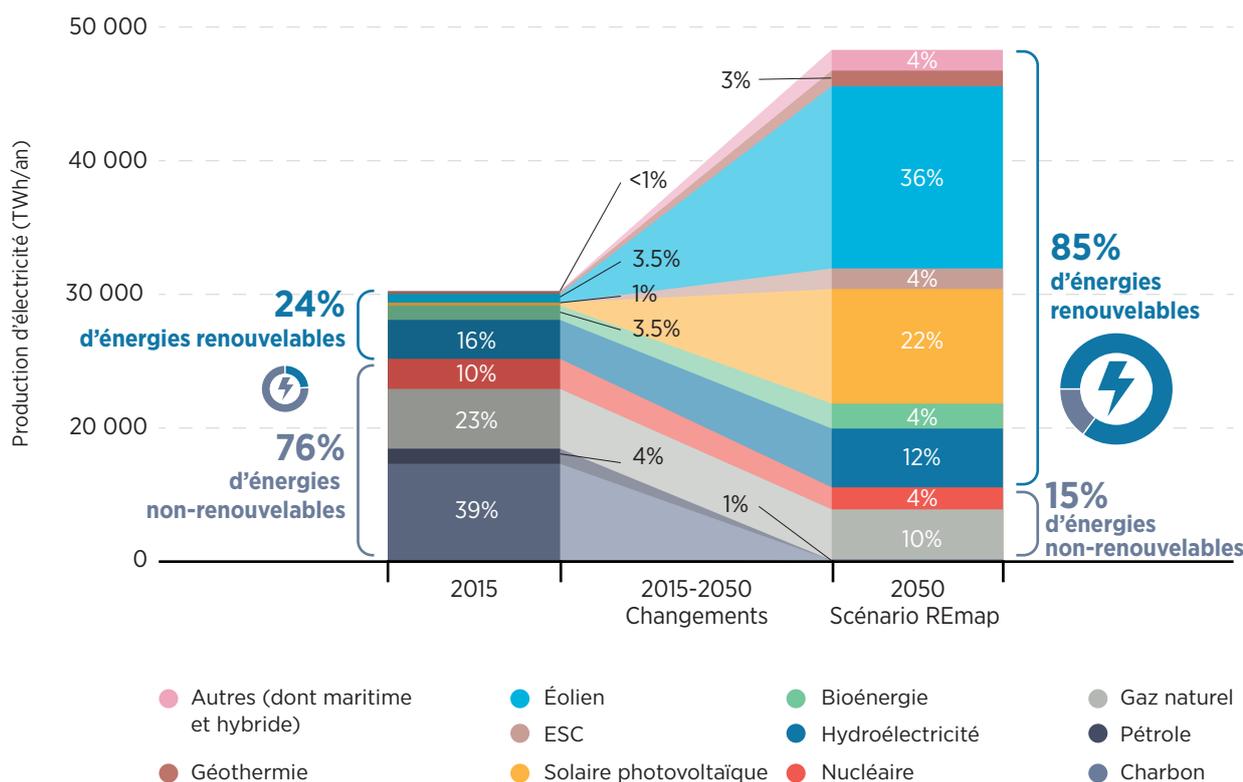
---



Par conséquent, **l'innovation visant à intégrer une proportion importante d'ERV dans les systèmes électriques est cruciale pour le succès de la transformation énergétique globale.**<sup>3</sup> L'intégration d'une part aussi importante d'ERV a des implications importantes : les systèmes électriques doivent devenir plus flexibles, les coûts

du système doivent être limités, et les systèmes doivent prendre en compte les changements résultant des tendances d'innovation actuelles, par exemple la numérisation, l'électrification et la décentralisation, qui auront probablement lieu avec ou sans l'intégration des ERV.

**Figure S1** Répartition de la production d'électricité selon les sources dans un scénario compatible avec l'Accord de Paris



Remarques : ESC = énergie solaire concentrée, TWh = térawattheure, an. = année.

Source : IRENA (2018c), *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*, [www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA\\_Report\\_GET\\_2018.pdf](http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf)

<sup>3</sup> Le rapport complet contient des informations détaillées concernant les innovations émergentes qui peuvent faciliter l'intégration d'une part élevée d'ERV, notamment en augmentant la flexibilité du système électrique. Ce travail s'appuie sur l'analyse de centaines de projets et initiatives innovants actuellement mis en œuvre dans le monde entier et appliqués à l'ensemble du secteur de l'électricité, et traitant des technologies génériques, de la organisation du marché, des modèles économiques et de l'exploitation du système électrique. Ces innovations ont été cartographiées et regroupées en catégories, avec pour résultat une série de 30 innovations.

## II. LES TENDANCES EN MATIÈRE D'ÉLECTRIFICATION, DE DÉCENTRALISATION ET DE NUMÉRISATION MODIFIENT LE PARADIGME DU SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ

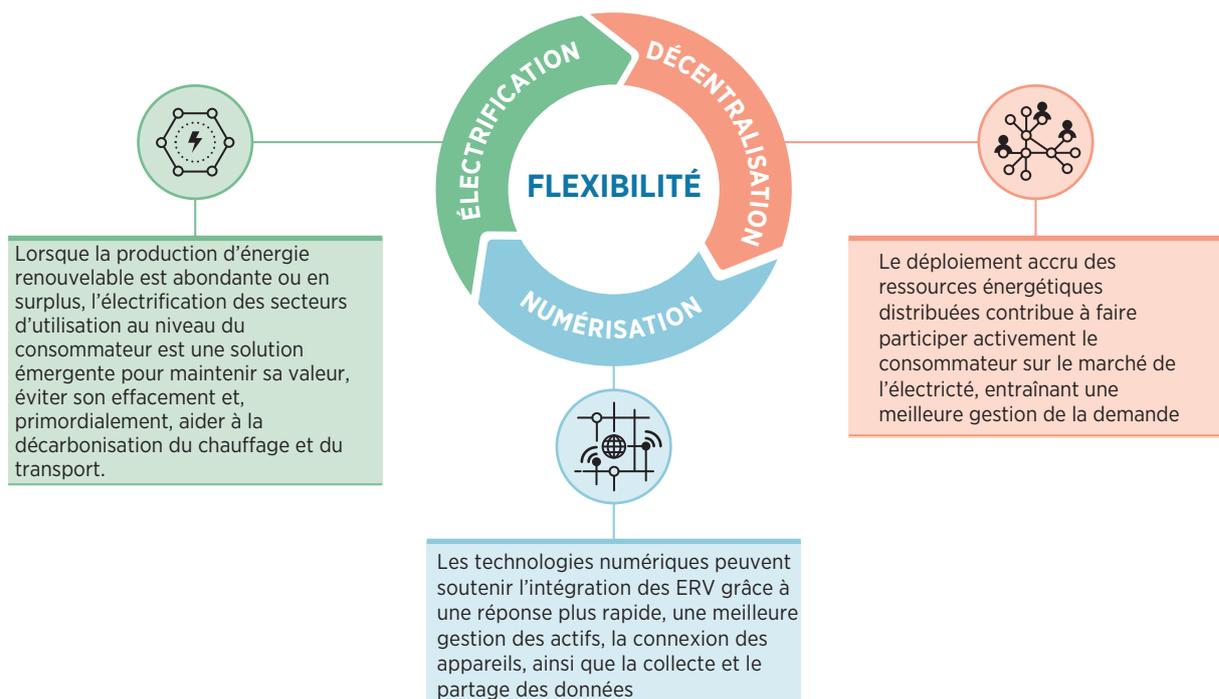
La transformation actuelle du secteur de l'électricité est accélérée par l'association de **l'électrification**, de la **décentralisation** et de la **numérisation** (Figure S2).

Ces fortes tendances en matière d'innovation modifient les paradigmes, permettent la flexibilité du système pour une plus grande pénétration des ERV, modifient les rôles et les responsabilités et ouvrent la porte aux nouveaux arrivants dans le secteur.

### Électrification des secteurs d'utilisation finale

L'électrification à partir des énergies renouvelables constitue le fondement de la décarbonisation des secteurs d'utilisation finale (transport, bâtiment et industrie). Par conséquent, les nouvelles charges d'électricité (*par exemple* les véhicules électriques (VE), les pompes à chaleur, les chaudières électriques) sont connectées à des systèmes électriques à plus grande échelle, principalement au niveau de la distribution. Si elles ne sont pas correctement gérées, ces nouvelles charges peuvent entraîner un besoin de capacité électrique additionnelle et exercer une pression sur le réseau, nécessitant un investissement supplémentaire afin de renforcer l'infrastructure électrique.

**Figure S2** Les trois tendances qui transforment le secteur de l'électricité



### Encadré 1 La flexibilité grâce aux véhicules électriques à charge intelligente

Les véhicules électriques transforment non seulement l'industrie du transport, mais sont également sur le point de redéfinir le marché de l'énergie en offrant une nouvelle source de flexibilité. Quatre millions de véhicules électriques à usage personnel étaient déjà en circulation en juin 2018, dont 40% en Chine, sur environ un milliard de véhicules dans le monde (BNEF, 2018). L'immatriculation de véhicules électriques a atteint un nouveau record en 2017, avec plus d'un million de ventes dans le monde, ce qui représente environ 1,3% de l'ensemble des ventes de véhicules.

De nombreux pays et entreprises étudient la manière dont l'infrastructure de charge nécessaire pour ces véhicules peut être intégrée aux systèmes électriques. Nissan et Enel se sont par exemple associées pour mettre en œuvre une solution de gestion de l'énergie utilisant des unités de charge « vehicle-to-grid » (V2G) et permettant aux propriétaires de véhicules qui sont des utilisateurs d'électricité d'opérer comme des centres d'énergie individuels, capables de puiser de l'électricité, de la stocker et de la renvoyer vers le réseau. L'entreprise Nuvve fournit des solutions logicielles V2G pour permettre l'accord entre les acteurs du marché. Des projets pilotes ont été lancés au Danemark (Parker Project) et au Royaume-Uni afin de tester cette solution. En 2016, les propriétaires de véhicules électriques Nissan ont gagné de l'argent en injectant de l'électricité au réseau grâce aux chargeurs bidirectionnels d'Enel, et les gestionnaires de réseau de distribution (GRD) du Danemark et du Royaume-Uni ont bénéficié de services de régulation primaire du réseau (Nissan Newsroom Europe, 2016).

L'électrification des systèmes de chauffage se développe également. À la fin de l'année 2017, plus de 10 millions de pompes à chaleur avaient été installées en Europe (EPHA, 2018). Les pompes à chaleur créent des opportunités pour les applications de gestion de la demande, comme le déplacement de la charge et l'écrêtement des périodes de pointe. Par ailleurs, les applications industrielles ont commencé à utiliser l'électricité afin de produire de l'hydrogène, de la chaleur et d'autres formes d'énergie, permettant ainsi la production d'électricité renouvelable intermittente et à moindre coût, qui est susceptible d'être absorbée durant les périodes de pic de production.

À l'inverse, si elles sont correctement gérées, ces nouvelles charges peuvent devenir elles-mêmes une source de flexibilité grâce à des stratégies de gestion de la demande qui peuvent aider à intégrer davantage d'énergies renouvelables au sein du système électrique. Bon nombre de ces nouvelles charges sont intrinsèquement flexibles, car (a) elles comportent des batteries (*par exemple* les batteries des véhicules électriques) ou un stockage thermique (*par exemple* les pompes à chaleur ou les chaudières électriques comportant un réservoir d'eau chaude) et (b) leur utilisation peut être décalée dans le temps, ce qui permet d'adapter le profil de consommation à la disponibilité de la production et à la capacité du réseau de distribution. **Une approche intelligente de l'électrification est essentielle** afin de tirer parti au mieux de ces avantages, ce qui implique d'utiliser de manière optimale les équipements électriques et d'inciter les clients à modifier leurs habitudes de consommation afin de les adapter aux besoins du système électrique.

#### Décentralisation des systèmes électriques

L'émergence de ressources énergétiques distribuées (RED) utilisées par les consommateurs finaux permet en effet de décentraliser le système électrique. Ces ressources comprennent les centrales solaires photovoltaïques, les micro-éoliennes, les systèmes de stockage d'énergie sur batteries du côté de l'utilisateur (« batteries derrière le compteur »), les pompes à chaleur et les

### Encadré 2 Un meilleur accès à l'énergie grâce aux RED et à la numérisation

Les énergies renouvelables distribuées associées aux technologies numériques aident également à traiter le problème de l'accès à l'énergie. Récemment, des modèles comme le « pay-as-you-go » (crédit-bail), l'échange d'énergie en « peer-to-peer » (pair à pair ou P2P) et les communautés d'énergie ont gagné en popularité sur les marchés de l'énergie hors réseau. Les modèles « pay-as-you-go » ont, par exemple, amélioré l'accès à l'énergie pour 83,7 millions de personnes dans le monde (GOGLA, 2017). M-KOPA, l'une des entreprises utilisant le modèle « pay-as-you-go », fournit des installations solaires domestiques à des ménages au Kenya et en Ouganda, et utilise les systèmes mobiles de paiement pour collecter les redevances. L'entreprise a fourni un accès à l'électricité à plus de 600 000 habitations dans ces pays, donnant la possibilité aux familles de s'éclairer, de recharger leurs téléphones et d'avoir des appareils ménagers comme une télévision ou un réfrigérateur (Quartz Africa, 2018). SOLshare, une start-up basée au Bangladesh, utilise des plateformes d'échange d'énergie en pair à pair, basées sur les technologies d'énergie distribuée (SOLshare, 2017). Les plateformes d'échange d'électricité exploitent la production en excès provenant des installations solaires domestiques en la vendant aux ménages voisins, réduisant ainsi le coût annuel de l'accès à l'énergie d'au moins 25%. L'entreprise prévoit d'installer plus de 20 000 nano-réseaux et d'alimenter plus d'un million de clients au Bangladesh d'ici à 2030 (CCNUCCC, 2018).

véhicules électriques rechargeables. La production d'électricité à partir d'éoliennes et de centrales solaires photovoltaïques est aujourd'hui, en grande partie, centralisée. Cependant, grâce aux centrales solaires photovoltaïques, notamment en toiture, qui représentent actuellement environ 1% de la production d'électricité, la production décentralisée se développe à un rythme soutenu. Le stockage décentralisé s'est aussi intensifié. Un modèle économique basé sur le stockage du côté de l'utilisateur permet aux clients de stocker l'électricité générée par leurs panneaux solaires pour l'utiliser ultérieurement ou la vendre en l'injectant sur le réseau. **La décentralisation basée sur les RED peut être une importante source de flexibilité grâce, par exemple, à des mesures de maîtrise de la demande ainsi qu'à des modèles économiques impliquant des agrégateurs.**

#### Décentralisation du secteur de l'électricité

L'application de la surveillance numérique et des technologies de contrôle de la production et de la transmission de l'électricité constitue une tendance importante depuis plusieurs décennies, et elle a

récemment commencé à être appliquée davantage dans les systèmes électriques. L'utilisation accrue des compteurs et capteurs intelligents, l'application de l'Internet des OBJETS (IdO) et l'utilisation de grandes quantités de données couplées à l'intelligence artificielle ont créé des opportunités permettant de fournir de nouveaux services au système électrique. Les technologies numériques encouragent la transformation du secteur de l'électricité de différentes manières, y compris : une meilleure surveillance des actifs et de leurs performances, des opérations plus précises et un contrôle plus proche du temps réel, une mise en œuvre de nouvelles conceptions du marché, et l'émergence de nouveaux modèles économiques.

**La numérisation est un élément clé dans la transformation énergétique, car elle permet de gérer de grandes quantités de données et d'optimiser les systèmes à l'aide de petites mais nombreuses unités de production.** Une communication et un contrôle accrus, et, à l'avenir, des contrats intelligents automatisés basés sur la technologie blockchain permettent aux ressources énergétiques distribuées d'être regroupées par des agrégateurs.

### Encadré 3 Les technologies numériques facilitent la participation des ménages au marché

Selon les estimations, plus de 700 millions de compteurs intelligents ont été installés à travers le monde, dont environ 400 millions rien qu'en Chine. De plus, d'ici à 2025, 75 milliards d'appareils électriques devraient être connectés à l'IdO dans le monde entier, offrant une mine d'informations aux consommateurs, aux fabricants et aux fournisseurs de services (Statista, 2018).

De nombreuses entreprises étudient la manière dont elles peuvent bénéficier de l'utilisation de tels appareils pour des applications liées à l'énergie. Envision Energy, une entreprise chinoise spécialisée dans l'énergie intelligente, investit par exemple dans la recherche sur les prévisions avancées en matière d'énergies renouvelables, en partenariat avec le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMET), le Met Office (service national britannique de météorologie) et l'Université d'Aarhus (BTECH CET). Les recherches sont basées sur l'utilisation de données scientifiques récentes, de modèles, d'algorithmes et de technologies de supercalcul afin de fournir des prévisions avancées en matière de production d'électricité renouvelable. Les modèles prévisionnels avancés peuvent accroître la précision des évaluations des ressources énergétiques et améliorer la capacité du réseau à planifier les apports en énergies renouvelables, ce qui permet de réduire le coût moyen de l'énergie solaire et éolienne.<sup>4</sup>

Elia, le gestionnaire de réseau de distribution belge, permet à la capacité RED de fournir des services d'équilibrage du réseau. Grâce à une plateforme informatique partagée, tous les consommateurs et générateurs connectés au réseau de distribution et de transmission peuvent fournir quotidiennement des services de flexibilités au GRD (Elia, 2018). Par ailleurs, en avril 2018, Elia a lancé un projet pilote de blockchain, explorant les opportunités offertes par cette technologie en matière de système de paiement afin d'aborder l'aspect commercial des transactions rapides et complexes.

En 2018, Sonnen, une entreprise allemande de solutions de batteries, a reçu une certification officielle de la part du GRD Tennet l'autorisant à fournir des services relatifs au réseau et à participer au marché d'équilibrage de l'électricité du pays.<sup>5</sup> Les services relatifs au réseau sont fournis en regroupant 30 000 systèmes domestiques de stockage mis en réseau. Ils forment aujourd'hui le plus vaste ensemble de batteries virtuelles au monde, avec une capacité de 300 mégawattheures (MWh). Les installations solaires domestiques interconnectées sont capables de prendre en charge tous les services relatifs au réseau fournis par les centrales à charbon conventionnelles, et l'on estime qu'elles peuvent remplacer une centrale à charbon classique avec une capacité installée de 800 mégawatts (MW).

<sup>4</sup> [www.envision-energy.com/2017/12/11/envision-energy-announces-new-strategic-renewable-energy-forecasting-partnership/](http://www.envision-energy.com/2017/12/11/envision-energy-announces-new-strategic-renewable-energy-forecasting-partnership/).

<sup>5</sup> [www.montelnews.com/en/story/sonnen-balances-german-power-with-home-batteries--report/959924](http://www.montelnews.com/en/story/sonnen-balances-german-power-with-home-batteries--report/959924).

En plus de fournir une variété de services énergétiques utiles, la production décentralisée et les technologies génériques sont devenues des sources de données précieuses. Les informations détaillées et en temps réel concernant les habitudes des consommateurs, les profils de consommation, la performance des composants au sein des systèmes électriques en cas de panne peuvent permettre aux opérateurs de mieux organiser et gérer le réseau électrique. Il devient aussi possible d'améliorer les prévisions en matière de production et de consommation d'électricité par les sources décentralisées, sur la base de modèles de comportements antérieurs. Ces développements permettent de mieux gérer les actifs et les opérations, augmentant ainsi la flexibilité générale du système.

L'importance croissante de la numérisation est aussi due aux progrès en matière de décentralisation et d'électrification. La décentralisation permet la mise en place d'un plus grand nombre de petites unités de production électrique, principalement les centrales solaires photovoltaïques en toiture. L'électrification du transport et du chauffage implique de nombreuses nouvelles charges, telles que les véhicules électriques, les pompes à chaleur et les chaudières électriques. Tous ces nouveaux actifs du côté de l'offre (du fait de la décentralisation) et du côté de la demande (du fait de l'électrification) ont un impact sur les systèmes électriques, rendant la surveillance, la gestion et le contrôle des systèmes électriques essentiels pour une transformation énergétique réussie.

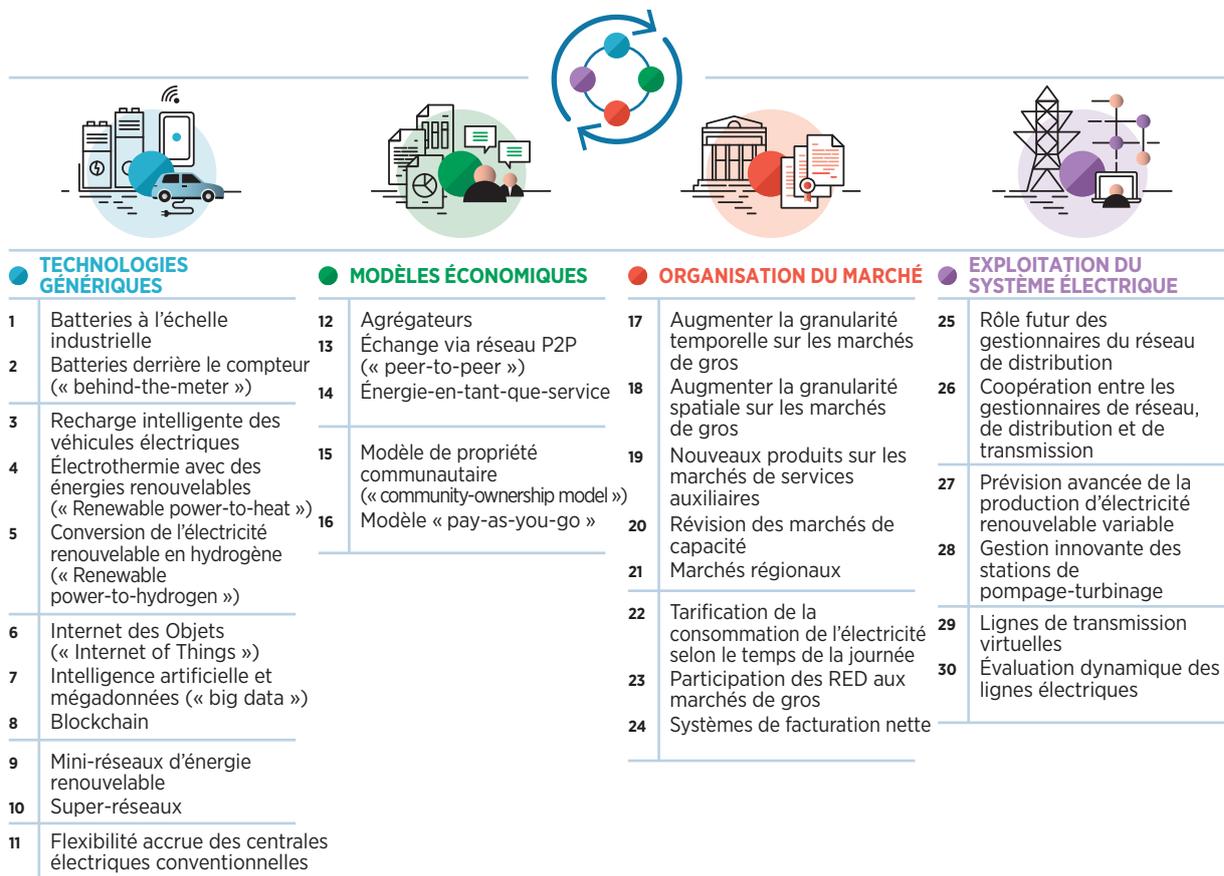


# III. LE PANORAMA DES INNOVATIONS POUR L'INTÉGRATION DES ERV COUVRE LES TECHNOLOGIES GÉNÉRIQUES, L'ORGANISATION DU MARCHÉ DE L'ÉLECTRICITÉ, LES MODÈLES ÉCONOMIQUES ET L'EXPLOITATION DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Les innovations en matière d'intégration des énergies renouvelables variables dans les systèmes électriques ne manquent pas. L'IRENA a étudié les innovations pouvant faciliter l'intégration d'une grande partie des ERV. **L'analyse du paysage a permis d'identifier 30 types d'innovations à travers quatre dimensions : les technologies génériques, les modèles économiques, la organisation du marché et l'exploitation du système électrique**, comme présenté sur la Figure S3.

*La transformation de l'énergie nécessite des innovations en matière de technologies génériques, de modèles économiques, de organisation du marché, et d'exploitation du système électrique*

**Figure S3** Le panorama des innovations pour la transformation du secteur de l'électricité



Ces innovations et les projets qui les appliquent sont examinés en détail dans plusieurs notes d'information sur les innovations associés à cette étude.

- **Technologies génériques.** Les technologies permettant une plus grande flexibilité des systèmes électriques jouent un rôle clé dans l'intégration des énergies renouvelables variables. Les technologies de production conventionnelle existantes, telles que les centrales électriques à charbon, sont actuellement modernisées pour devenir plus flexibles. Le stockage sur batteries, la gestion de la demande et les technologies numériques modifient le secteur de l'électricité, ouvrant la porte à de nouvelles applications qui améliorent la flexibilité du système. L'électrification des secteurs d'utilisation finale émerge en tant que nouveau marché pour les énergies renouvelables mais pourrait aussi fournir de nouvelles façon de flexibiliser la demande, à condition d'être effectuée de manière intelligente.
- **Modèles économiques.** Des modèles économiques innovants sont essentiels pour monétiser la valeur créée par ces technologies et permettre leur adoption à plus grande échelle. Du côté du consommateur, de nombreux

modèles économiques innovants émergent grâce au déploiement des RED, ainsi que des projets innovants qui permettent l'alimentation en électricité renouvelable dans des endroits aux options limitées, tels que les zones hors réseau ou à faible densité de population.

- **Organisation du marché.** Adapter l'organisation du marché à un paradigme en pleine évolution, orienté vers des systèmes électriques neutres en carbone et intégrant une part élevée d'ERV, est essentiel pour permettre une création de valeur et un flux de revenus adéquat, comme exposé dans une précédente analyse de l'IRENA (IRENA, 2017b). L'innovation dans le marché de gros et de détail de l'électricité est nécessaire afin de développer le potentiel de flexibilité du système électrique.
- **Exploitation du système électrique.** En plus des nouvelles technologies et d'une solide organisation du marché de l'électricité, des innovations en matière d'exploitation du système électrique sont aussi nécessaires et émergent afin d'intégrer une plus grande partie des ERV au réseau. Parmi elles, des innovations qui permettent d'atténuer l'incertitude et l'exploitation innovante du système afin d'intégrer les RED.

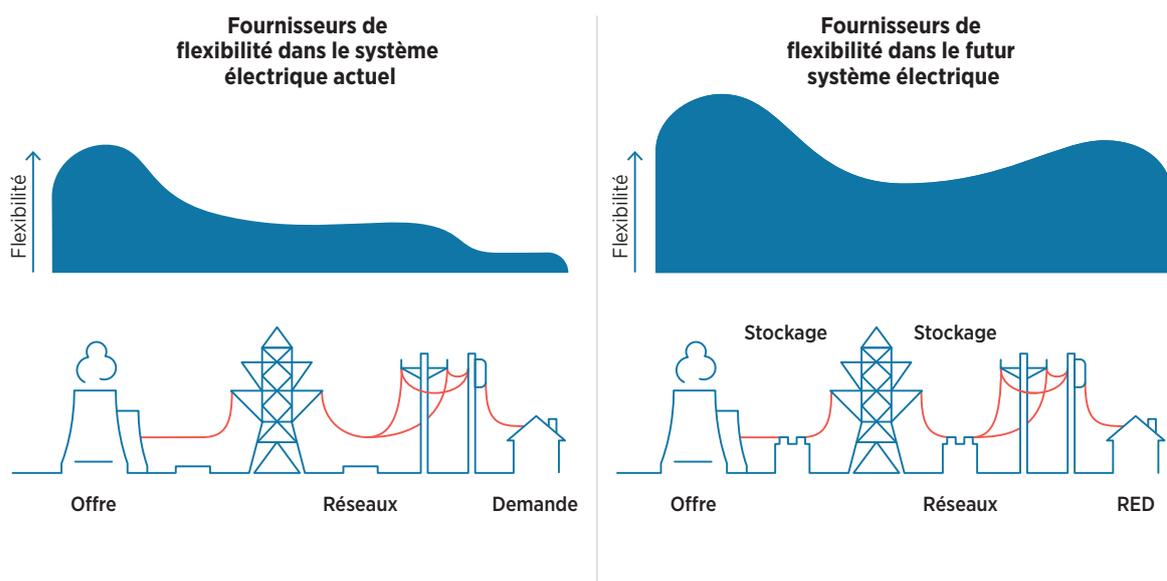


## IV. LES INNOVATIONS PEUVENT AMÉLIORER LA FLEXIBILITÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

Traditionnellement, dans les systèmes électriques conventionnels, la flexibilité est principalement fournie du côté de l'offre, avec une production électrique pouvant être répartie et ajustée pour suivre la demande et, si disponible, un pompage-turbinage gérant une charge de base inflexible et réduisant le besoin en centrales électriques destinées à couvrir la demande de pointe. Au cours des dernières décennies, d'importants progrès ont été réalisés afin d'accroître la flexibilité des centrales électriques conventionnelles. La demande n'a historiquement fourni aucune flexibilité. **Les innovations émergentes augmentent non**

**seulement la flexibilité fournie du côté de l'offre d'électricité, mais elles élargissent la disponibilité de la flexibilité à tous les segments des systèmes électriques, y compris au niveau du réseau et du côté de la demande.** Elles offrent un éventail de solutions plus large, solutions qui peuvent être associées et optimisées afin de réduire les coûts tout en maximisant les avantages pour le système. La Figure S4 ci-dessous illustre le passage d'un système dans lequel la production était la principale source de flexibilité à un nouveau système, dans lequel tous les segments peuvent être flexibles.

**Figure S4** Nouvelles options de flexibilité du secteur de l'électricité débloquées par l'innovation



Les opportunités permettant d'accroître la flexibilité à travers le système électrique sont les suivantes :

- *Flexibilité du côté de l'offre* : une plus grande incitation est nécessaire pour accroître la flexibilité du côté de l'offre. Une plus grande flexibilité des centrales électriques conventionnelles peut être atteinte en diminuant les charges opérationnelles minimales, en réduisant la durée de mise en route et en augmentant le taux de rampe.
- *Flexibilité du réseau* : Celle-ci peut être accrue grâce à une plus grande capacité du réseau et des interconnexions dans des marchés régionaux, qui permettent à l'électricité d'être transportée plus facilement au sein d'un secteur d'équilibrage plus vaste, à travers plusieurs zones de contrôle, et même à l'échelle d'un continent. La capacité et la gestion du réseau sont aussi importantes pour intégrer davantage d'énergies renouvelables à partir de sources reliées au réseau de distribution.

- *Flexibilité du côté de la demande* : Du côté de la demande, l'émergence des RED, associée à une organisation du marché permettant la participation de ces dernières, peut permettre d'augmenter considérablement la flexibilité du système. En participant activement au réseau électrique, les RED peuvent répondre aux conditions du système et peuvent offrir des services au réseau.
- *Flexibilité à l'échelle du système entier avec du stockage* : les technologies de stockage de l'énergie sont des fournisseurs de flexibilité essentiels qui peuvent être connectés à travers l'intégralité du système électrique entier. Les batteries à échelle industrielle et les applications « Power-to-X » (conversion d'électricité en hydrogène, par exemple) peuvent augmenter la flexibilité du côté de l'offre en stockant les ERV produites en excès, et faire de même du côté de la demande grâce à une électrification intelligente des secteurs d'utilisation finale. Elles peuvent aussi augmenter la flexibilité du réseau en réduisant sa congestion.



# V. DES SOLUTIONS SUR MESURE SONT MISES AU POINT EN UTILISANT LES INNOVATIONS COMME ÉLÉMENTS DE BASE

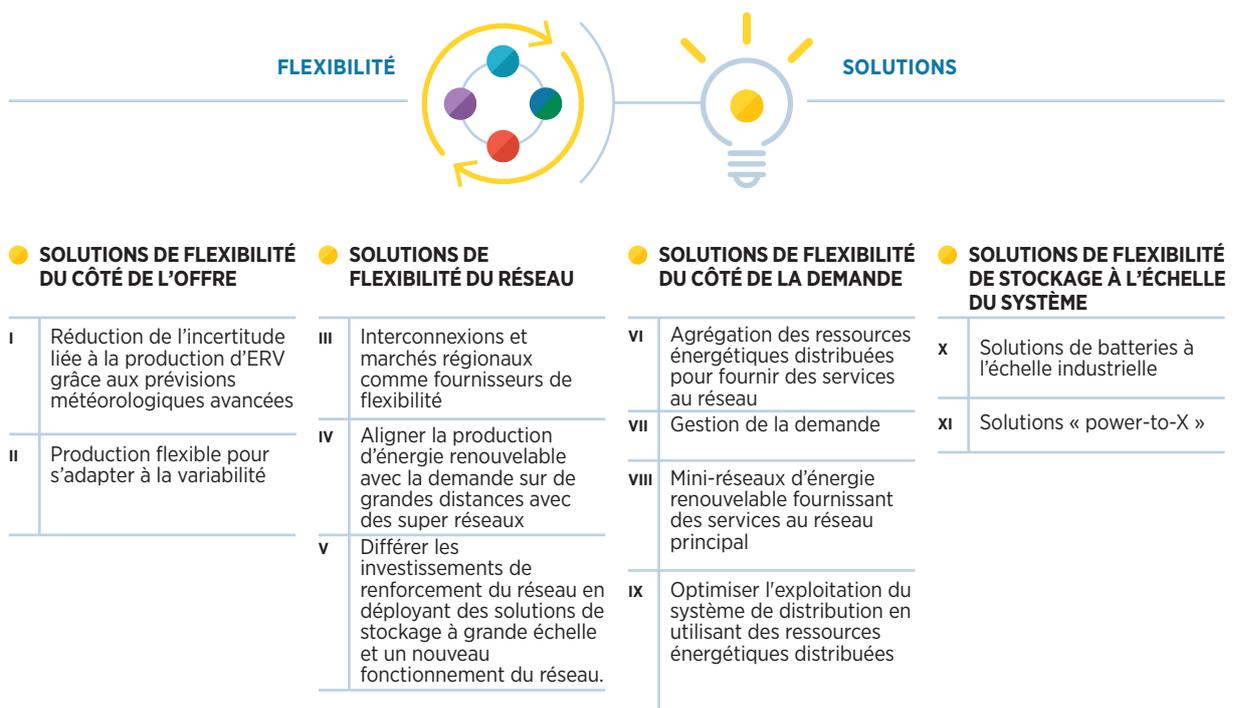
Cette étude met en valeur 11 solutions pour une intégration des ERV basées sur leur pertinence et leur utilisation de plus en plus répandue, chacune d'entre elles combinant plusieurs innovations parmi les quatre dimensions d'innovation. Cette liste, bien que non exhaustive, vise à montrer comment les pays peuvent intégrer des ERV en associant différentes innovations adaptées à des contextes spécifiques. La Figure S5 liste les solutions favorisant la flexibilité examinée dans ce rapport.

**Les innovations ne sont pas mises en œuvre de façon isolée. Les synergies entre différentes innovations à travers toutes les dimensions peuvent offrir des solutions pour l'intégration**

**des ERV.** La conception d'une stratégie optimale visant à intégrer une part importante des ERV dans le système et la mise en œuvre de différentes innovations dépend du contexte de chaque pays. Différentes solutions offrent une flexibilité accrue dans différents segments du système électrique, depuis les producteurs vers les consommateurs.

La Figure S6 montre le lien entre les 30 innovations, ainsi que les 11 solutions en matière de flexibilité examinées dans cette étude. Les différentes innovations ont été utilisées comme éléments de base visant à créer des solutions pour l'intégration des ERV.

**Figure S5** Solutions pour davantage de flexibilité au sein du système électrique



Remarque : EnR = énergie renouvelable.

**Encadré 4 Exemples de solutions en matière de flexibilité mises en œuvre dans différents pays**

*Flexibilité du côté de l'offre (Allemagne) :* En Allemagne depuis 2009, en plus des générateurs conventionnels, les générateurs d'énergies renouvelables, les installations de stockage sur batterie et les charges industrielles ont aussi été autorisés à participer aux marchés d'équilibrage. De 2009 à 2015, la taille du marché d'équilibrage en gigawatts a reculé de 20% et les coûts d'approvisionnement en services auxiliaires de la GRD ont diminué de 70%. À la même période, la stabilité du système s'est accrue et la capacité installée des ERV a augmenté de 200%. Cela indique que permettre aux ressources d'énergie alternatives de participer aux marchés de services auxiliaires peut aider à accroître la stabilité du système tout en réduisant les coûts (Wang, 2017).

*Flexibilité du réseau (Danemark) :* Le taux de pénétration élevé de l'énergie éolienne est dû en grande partie à une forte interconnexion avec les réseaux des pays voisins. Le Danemark exporte principalement son surplus d'énergie éolienne aux autres pays nordiques qui peuvent utiliser ces importations pour remplacer leur production d'hydroélectricité et conserver l'eau dans les réservoirs. Le réseau de distribution interne du Danemark est robuste, et sa capacité d'interconnexion avec le reste de la Scandinavie ou avec l'Allemagne est presque égale à la charge de pointe de 6,5 GW (capacité d'importation depuis l'Allemagne 2,2 GW, depuis la Suède 2 GW, depuis la Norvège 1,6 GW).

*Flexibilité du côté de la demande (États-Unis) :* Con Edison, un fournisseur basé à New York, offre une réduction aux clients qui souscrivent au programme de réponse à la demande. Les clients autorisent le fournisseur à ajuster leur thermostat au maximum 10 fois par an (Con Edison, 2016). De la même façon, STEM, une entreprise basée aux États-Unis, aide les clients du secteur commercial et industriel à réduire leur facture d'énergie en utilisant l'énergie stockée dans leurs batteries durant les périodes de pointe. L'entreprise associe le stockage sur batterie et les systèmes d'analyse du « Cloud » afin d'identifier le meilleur moment pour puiser de l'énergie depuis les batteries (Colthorpe, 2017). STEM utilise sa technologie d'intelligence artificielle (Pickerel, 2018).

*Flexibilité à l'échelle du système entier avec du stockage (Australie) :* L'entreprise américaine Tesla a récemment commandé un système de stockage sur batteries lithium-ion ayant une capacité de 100 MW/129 MWh, au sein du Parc éolien de Hornsdale (315 MW) en Australie du Sud. Le système de stockage a été installé pour renforcer l'énergie produite par le parc éolien tout en fournissant des services auxiliaires au réseau d'Australie du Sud (McConnell, 2017). Autre exemple de flexibilité de stockage, le projet HyStock, développé aux Pays-Bas. Il consiste en un électrolyseur de 1 MW et un champ de panneaux solaires de 1 MW qui fourniront une partie de l'électricité nécessaire à la production d'hydrogène. Le projet est situé à proximité d'une grotte de sel qui peut être utilisée comme zone tampon pour stocker l'hydrogène produit par l'électrolyseur après sa compression. L'hydrogène peut ensuite être inséré dans des cylindres de stockage et transporté à destination des utilisateurs finaux. Le projet étudie en détail la manière dont cet électrolyseur pourrait aussi présenter des avantages pour le secteur de l'électricité, par exemple en offrant des services auxiliaires au réseau (EnergyStock, 2018).



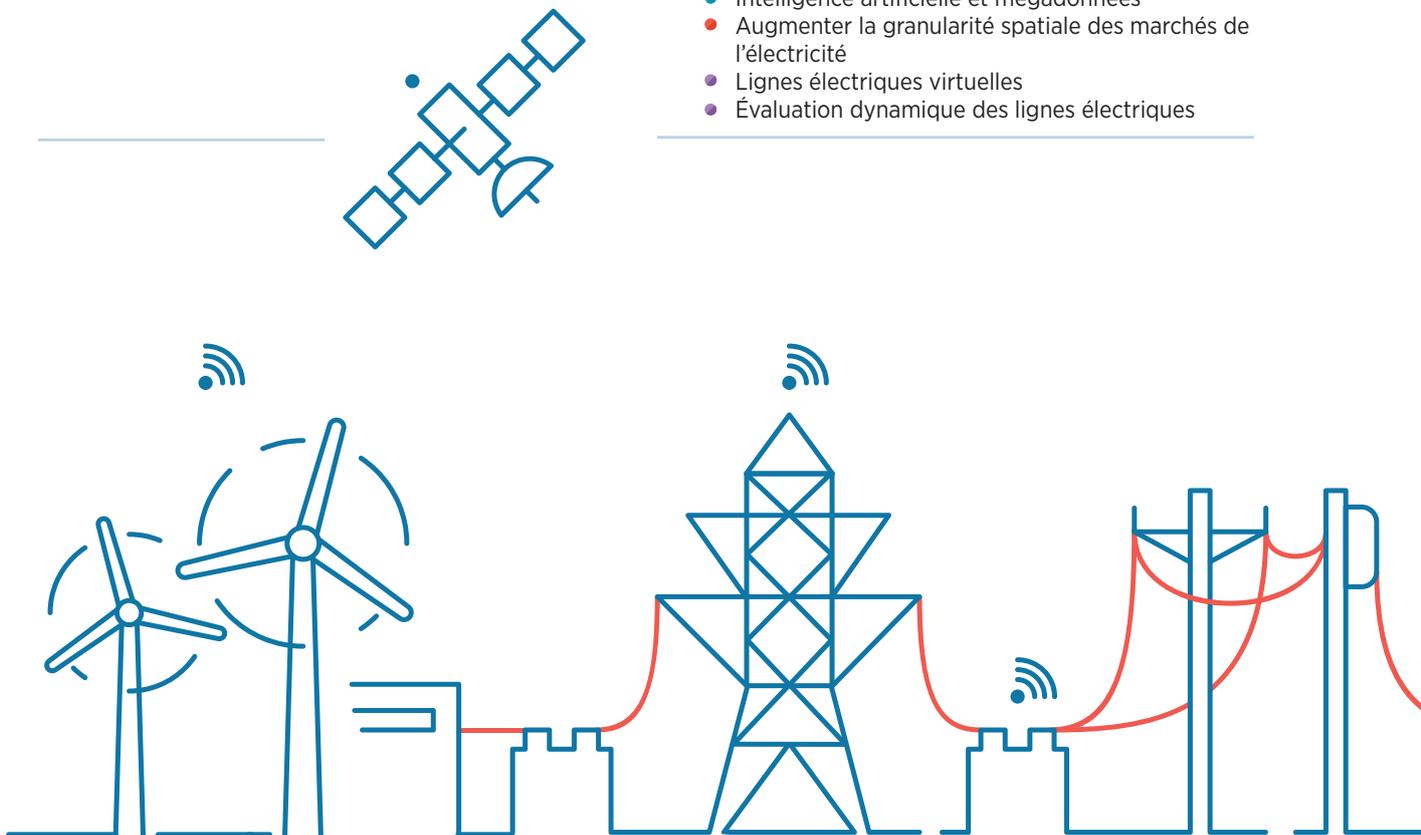
**Figure S6** Solutions de flexibilité créées en associant des innovations en matière de technologies génériques, de modèles économiques, d'organisation du marché, et d'exploitation du système électrique

**SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ DU CÔTÉ DE L'OFFRE**

- **Solution I :**  
**Diminuer l'incertitude liée à la production d'ERV grâce aux prévisions météorologiques avancées**
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Augmenter la granularité temporelle des marchés de l'électricité
  - Augmenter la granularité spatiale des marchés de l'électricité
  - Prévisions avancées en matière de production d'électricité renouvelable variable
- **Solution II :**  
**Production flexible pour s'adapter à la variabilité**
  - Flexibilité des centrales électriques conventionnelles
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Blockchain
  - Augmenter la granularité temporelle des marchés de l'électricité
  - Services auxiliaires innovants
  - Repenser les marchés de capacités
  - Opération innovante des stations de pompage-turbinage

**SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ DU RÉSEAU**

- **Solution III :**  
**Interconnexions et marchés régionaux comme fournisseurs de flexibilité**
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Blockchain
  - Marchés régionaux
  - Augmenter la granularité temporelle des marchés de l'électricité
- **Solution IV :**  
**Aligner la production et consommation d'énergie renouvelable sur de grandes distances avec des super-réseaux**
  - Super-réseaux
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Marchés régionaux
- **Solution V :**  
**Reporter les investissements en renfort sur le réseau avec le stockage à grande échelle et un nouveau fonctionnement du réseau.**
  - Batteries à l'échelle industrielle
  - Renewable Power-to-heat
  - Renewable Power-to-hydrogen
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Augmenter la granularité spatiale des marchés de l'électricité
  - Lignes électriques virtuelles
  - Évaluation dynamique des lignes électriques



## SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ DU CÔTÉ DE LA DEMANDE

- **Solution VI : Agrégation des ressources énergétiques distribuées pour les services du réseau**
  - Batteries « behind-the-meter »
  - Rechargement intelligent des véhicules électriques
  - Renewable Power-to-heat
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Blockchain
  - Agrégateurs
  - Intégration des ressources énergétiques distribuées sur les marchés
  - Services auxiliaires innovants
  - Coopération entre les gestionnaires de réseau de distribution et de transmission
- **Solution VII : Gestion de la demande**
  - Batteries « behind-the-meter »
  - Rechargement intelligent des véhicules électriques
  - Power-to-heat renouvelable
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Énergie en tant que service
  - Tarification horaire
  - Systèmes de facturation nette
  - Prévisions avancées de la production d'électricité renouvelable variable
- **Solution VIII : Les mini-réseaux d'énergies renouvelables fournissent des services au réseau principal**
  - Mini-réseaux renouvelables
  - Batteries behind-the-meter
  - Rechargement intelligent des voitures électriques
  - Power-to-heat renouvelable
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Blockchain
  - Échange d'électricité peer-to-peer
  - Modèles de propriété communautaire
  - Intégration des ressources énergétiques distribuées sur les marchés
- **Solution IX : Optimiser l'exploitation du système de distribution avec les ressources énergétiques distribuées**
  - Internet des Objets
  - Batteries « behind-the-meter »
  - Rechargement intelligent des véhicules électriques
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Agrégateurs
  - Systèmes de facturation nette
  - Futur rôle des gestionnaires du réseau de distribution
  - Lignes électriques virtuelles

## SOLUTIONS DE FLEXIBILITÉ DE STOCKAGE À L'ÉCHELLE DU SYSTÈME

- **Solution X : Solutions de batteries à l'échelle industrielle**
  - Batteries à l'échelle industrielle
  - Internet des Objets
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Agrégateurs
  - Services auxiliaires innovants
  - Augmenter la granularité temporelle des marchés de l'électricité
  - Augmenter la granularité spatiale des marchés de l'électricité
  - Repenser les marchés de capacités
  - Lignes électriques virtuelles
- **Solution XI : Solutions power-to-X**
  - Renewable Power-to-hydrogen
  - Renewable Power-to-heat
  - Intelligence artificielle et mégadonnées
  - Services auxiliaires innovants
  - Lignes électriques virtuelles



- Technologies génériques
- Modèles économiques
- organisation du marché
- Exploitation du système électrique



# VI. ÉVALUATION DE L'IMPACT DE LA MISE EN ŒUVRE DE SOLUTIONS EN MATIÈRE DE FLEXIBILITÉ

Les décideurs politiques doivent reconnaître que la mise en œuvre de différentes solutions présente des enjeux variés, tels que la nécessité d'investir dans le développement des technologies et de l'infrastructure, des enjeux en matière de réglementation, la complexité liée à la coordination entre diverses parties prenantes, et de potentiels changements des rôles des principaux acteurs.

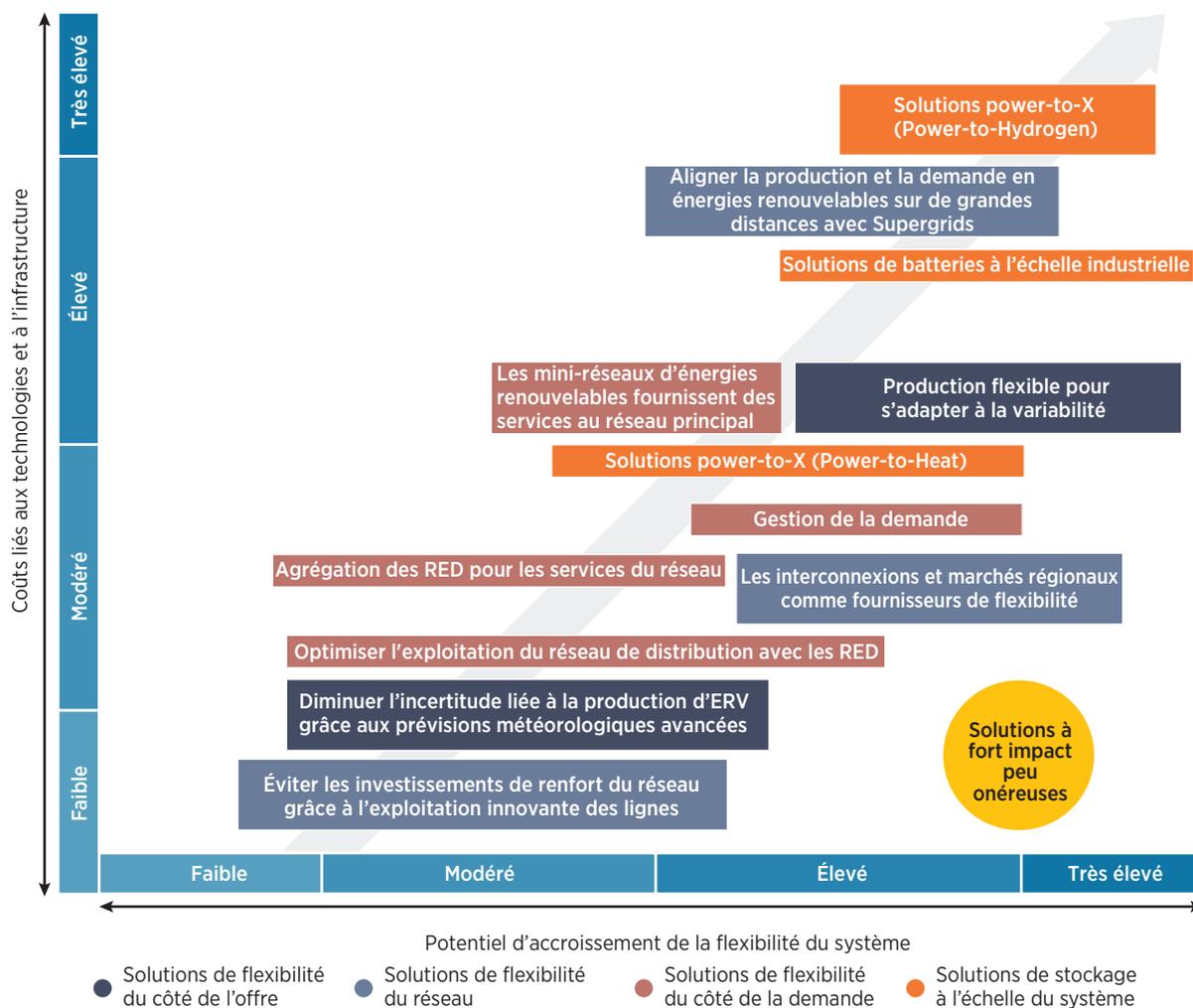
**En général, les solutions nécessitant le moins d'investissement en technologie ou infrastructures sont basées sur des innovations liées à l'exploitation du système électrique et l'organisation du marché.** Elles peuvent inciter des acteurs du secteur de l'électricité, nouveaux ou existants, à répondre efficacement aux nouvelles conditions du système basées sur les actifs existants. Le Tableau 1

ci-dessous illustre les enjeux importants qui peuvent accompagner différentes solutions et innovations.

La complexité de la mise en œuvre de solutions différentes varie, tout comme l'impact qu'a chaque solution dans l'obtention d'une part plus élevée d'ERV dans le mix électrique. La Figure S7 compare les solutions en fonction de leur potentiel en matière de coût et de flexibilité, tandis que la Figure S8 les compare en termes d'enjeux non technologiques, par exemple la nécessité de modifier des cadres réglementaires, l'engagement de plusieurs acteurs du secteur de l'énergie, et l'acceptation publique. Il n'existe pas de « solution miracle » ayant un fort impact positif, à bas coût et peu d'enjeux. Comme le montre la Figure S7, l'investissement requis par une solution est en général directement

**Tableau 1** Enjeux dans la mise en œuvre des innovations

	INVESTISSEMENT NÉCESSAIRE	ENJEUX
<b>Technologies génériques</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Élevé en matière d'investissement matériel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exploitation des technologies génériques</li> </ul>
<b>Modèles économiques</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limité en termes de matériel, mais élevé en termes de logiciels (un investissement en personnel et logiciels peut être nécessaire)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessité éventuelle de modifier la réglementation</li> <li>Mise en œuvre nécessaire de technologies numériques (comme les capteurs et les modèles prédictifs)</li> </ul>
<b>Organisation du marché</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limité en termes de matériel, mais élevé en termes de logiciels (<i>par exemple</i>, investissement logiciel dans les échanges d'énergie et chez les participants du marché)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modification du cadre réglementaire</li> <li>Enjeux politiques</li> <li>Nécessité éventuelle d'une coopération internationale</li> <li>Coordination entre plusieurs parties prenantes</li> <li>Modification des rôles des intervenants du secteur de l'électricité</li> <li>Un accord peut être long à trouver et à mettre en œuvre pour ne pas faire de perdants</li> </ul>
<b>Exploitation du système</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limité en termes de matériel, mais élevé en termes de logiciels (de nouveaux logiciels, outils et systèmes de contrôle peuvent être nécessaires)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Disponibilité des données</li> <li>Gestion des données</li> <li>Nécessité éventuelle de modifier la réglementation</li> </ul>

**Figure S7** Associer potentiel de flexibilité et coûts technologiques

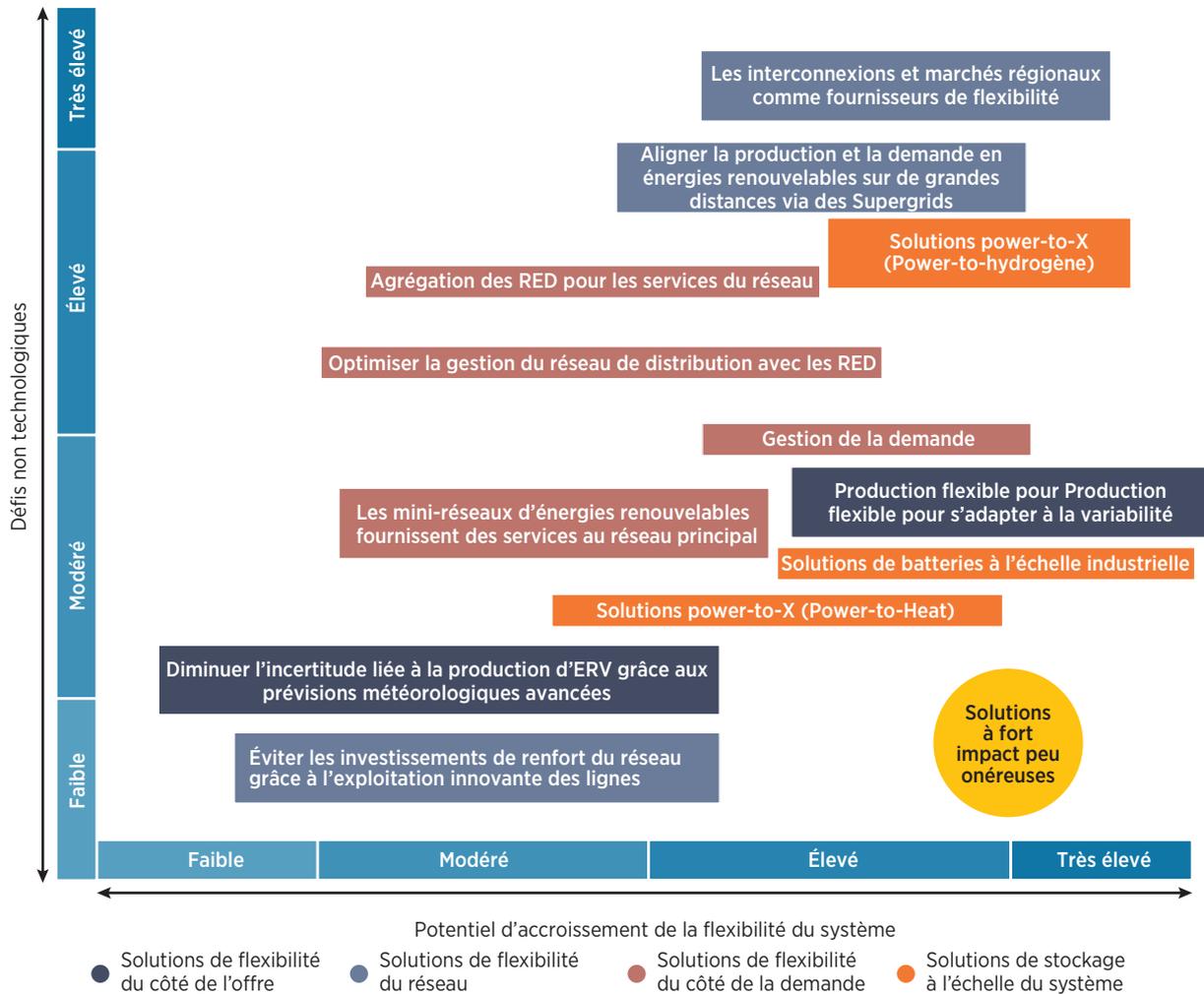
proportionnel au potentiel de flexibilité qu'elle offre. Cependant, la même proportionnalité n'est pas observée pour les enjeux non technologiques, comme le montre la Figure S8. Cela s'explique dans la mesure où chaque solution s'accompagne de divers enjeux et il devient difficile de comparer les solutions entre elles de manière absolue. Pour chaque solution, les enjeux sont influencés par les spécificités géopolitiques et par le contexte du système électrique.

La Figure S7 montre que les batteries à grande échelle, les super-réseaux et les électrolyseurs pour les applications de conversion de l'électricité en hydrogène sont des technologies coûteuses, mais des solutions ayant un impact important, voire très important, sur la flexibilité du système. Cependant, de nombreuses autres solutions offrent une flexibilité importante à un coût inférieur. Chaque système nécessite une évaluation spécifique du niveau requis de flexibilité, et des synergies qui peuvent être créées dans ce contexte.

Il existe néanmoins des synergies potentielles entre les solutions, qui peuvent entraîner un investissement moins important lorsqu'elles sont mises en œuvre ensemble. Par exemple, investir dans des technologies numériques afin de permettre aux RED de fournir des services au réseau peut aussi contribuer à une meilleure gestion de la demande. Investir dans des solutions d'électrothermie (« Power-to-Heat »), comme les pompes à chaleur à usage résidentiel, augmenterait l'impact des solutions du côté de la demande, en rendant la gestion de la demande plus efficace, en fournissant des services au réseau et en permettant aux gestionnaires du réseau de distribution (GRD) d'optimiser l'exploitation du système.

L'un des enjeux importants lié à de nombreuses solutions innovantes, considéré parmi les enjeux non technologiques sur la Figure S8, est l'évolution des rôles et responsabilités des parties prenantes. Par exemple, les solutions en matière de flexibilité du côté de la demande impliquent une modification du rôle des consommateurs et une transformation des habitudes de consommation.

**Figure S8** Associer potentiel de flexibilité et enjeux non technologiques



Remarque : Les enjeux non technologiques comprennent les modifications réglementaires requises, changements nécessaires de rôle des intervenants, ainsi que d'autres enjeux.

Pour intégrer les RED et leur permettre de déverrouiller la flexibilité du côté de la demande, des modifications du rôle du gestionnaire du réseau de transport d'électricité (GRT) et, plus important, du GRD, sont nécessaires. Modifier le rôle des intervenants au sein du système est un enjeu important, car les incitations et les modèles économiques adéquats sont nécessaires pour réussir la transition. Dans d'autres cas, le contexte politique et l'environnement international présentent souvent un défi spécifique lorsqu'il s'agit de coopération externe, de définir des rôles et responsabilités inter-systèmes et de donner la priorité aux avantages régionaux plutôt que nationaux. Ces éléments constituent peut-être les obstacles les plus importants pour l'établissement de marchés régionaux performants ou des accords basés sur des interconnexions.

De manière plus générale, les Figures S7 et S8 ci-dessus montrent que **les solutions axées du côté de la demande et basées sur des innovations en termes d'organisation du marché ont un coût inférieur** et un impact modéré à fort sur l'intégration des ERV. Elles constituent donc une option intéressante dans de nombreux pays, et par conséquent un bon point de départ. Les solutions présentant une utilisation plus intensive des **technologies génériques, telles que les innovations en matière de réseau, de stockage ou de « Power-to-X », nécessitent un investissement plus important, mais peuvent aussi avoir un impact plus fort sur l'intégration des ERV.** Elles sont donc plus adaptées aux étapes avancées, lorsque les pays atteignent une pénétration significative des ERV au sein de leurs systèmes électriques. Les cadres stratégiques doivent cependant anticiper les aspects liés à la planification réglementaire et de l'infrastructure, qui sont essentiels au succès de la mise en œuvre de ces solutions à un stade ultérieur.

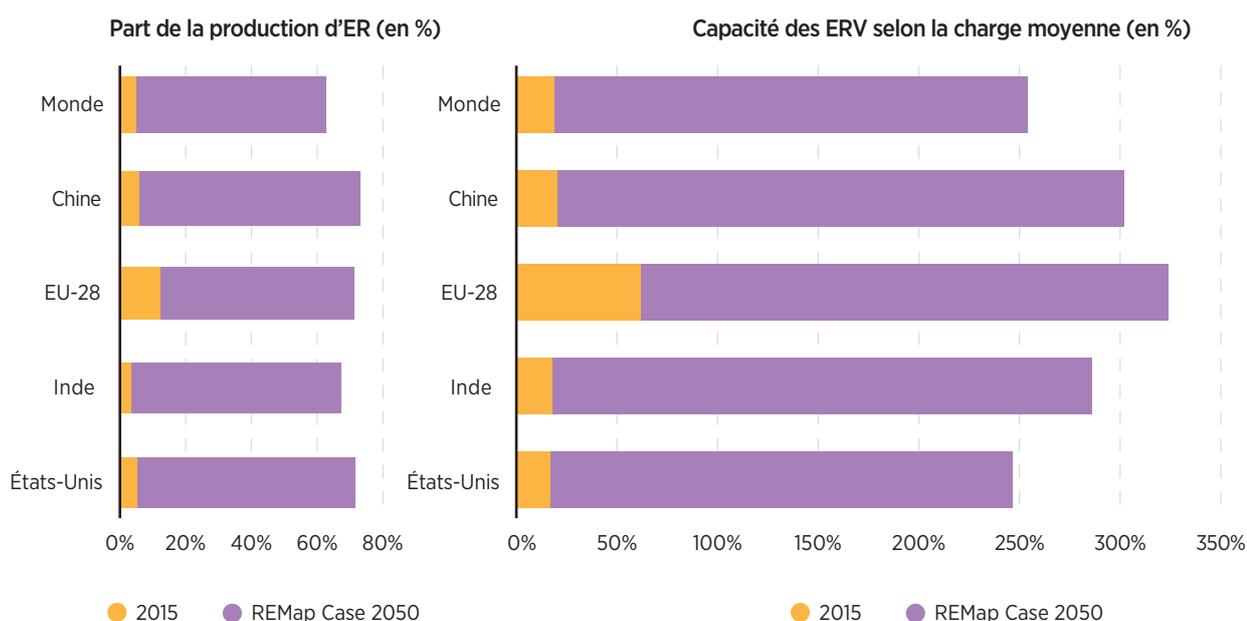
## VII. INNOVATIONS RÉDUISANT LES COÛTS DU SYSTÈME ET MAXIMISANT LES AVANTAGES

Globalement, dans un scénario compatible avec l'Accord de Paris, la part des ERV dans la production d'électricité devrait atteindre plus de 60% d'ici à 2050, et plusieurs pays devraient même atteindre une proportion supérieure, comme le montre la Figure S9. Un aspect plus important pour les systèmes électriques : durant les périodes de pic de production d'ERV, l'approvisionnement d'électricité pourrait dépasser considérablement la charge électrique du système dans de nombreux pays. Des systèmes flexibles et des approches

intelligentes peuvent permettre d'utiliser ce surplus d'électricité renouvelable tout en réduisant les enjeux supplémentaires liés à l'infrastructure et l'exploitation des systèmes électriques.

Dans le but d'atteindre une transformation rentable à l'échelle mondiale entraînant un système électrique neutre en carbone, durable, fiable et inclusif, les stratégies mises en œuvre doivent réduire les coûts liés à l'intégration des ERV tout en maximisant les avantages associés.

**Figure S9** Part des ERV dans la production totale d'électricité et capacité des ERV selon la charge moyenne, pour les pays sélectionnés en 2015 et en 2050 dans un scénario compatible avec l'Accord de Paris



Source : IRENA, selon des données REmap.

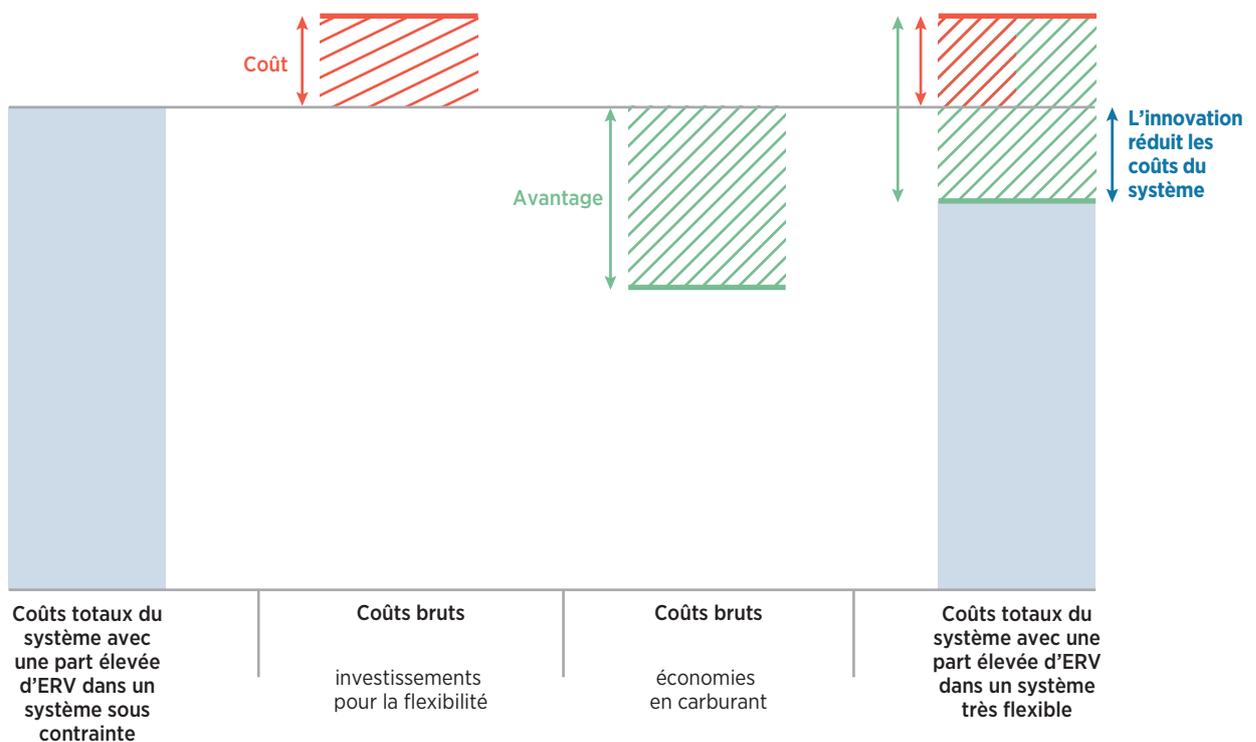
Un manque de planification adéquate dans l'intégration des ERV au sein des systèmes électriques pourrait entraîner des contraintes sévères avec des coûts du système plus élevés. Une planification judicieuse anticipant les exigences du système et des solutions émergentes en termes de flexibilité permet d'augmenter les avantages de la production d'ERV à faible coût (IRENA, 2017c), comme indiqué sur la Figure S10.

L'analyse de l'IRENA conclut que le niveau d'investissement dans le renforcement de l'infrastructure de réseau, le stockage et la production conventionnelle flexible pour l'intégration des ERV est d'un ordre de grandeur similaire à celui de l'investissement total nécessaire dans les technologies de production d'énergies renouvelables supplémentaires. Ces investissements sont estimés à environ 18 billions de dollars pour la période comprise entre 2015 et 2050 dans un scénario compatible avec l'Accord de Paris, en supposant que des options limitées de flexibilité sont mises en œuvre (IRENA, 2018c). Cela souligne l'importance de l'innovation visant à diminuer les coûts tout en augmentant les avantages de l'intégration d'une part plus élevée d'ERV dans le système électrique.

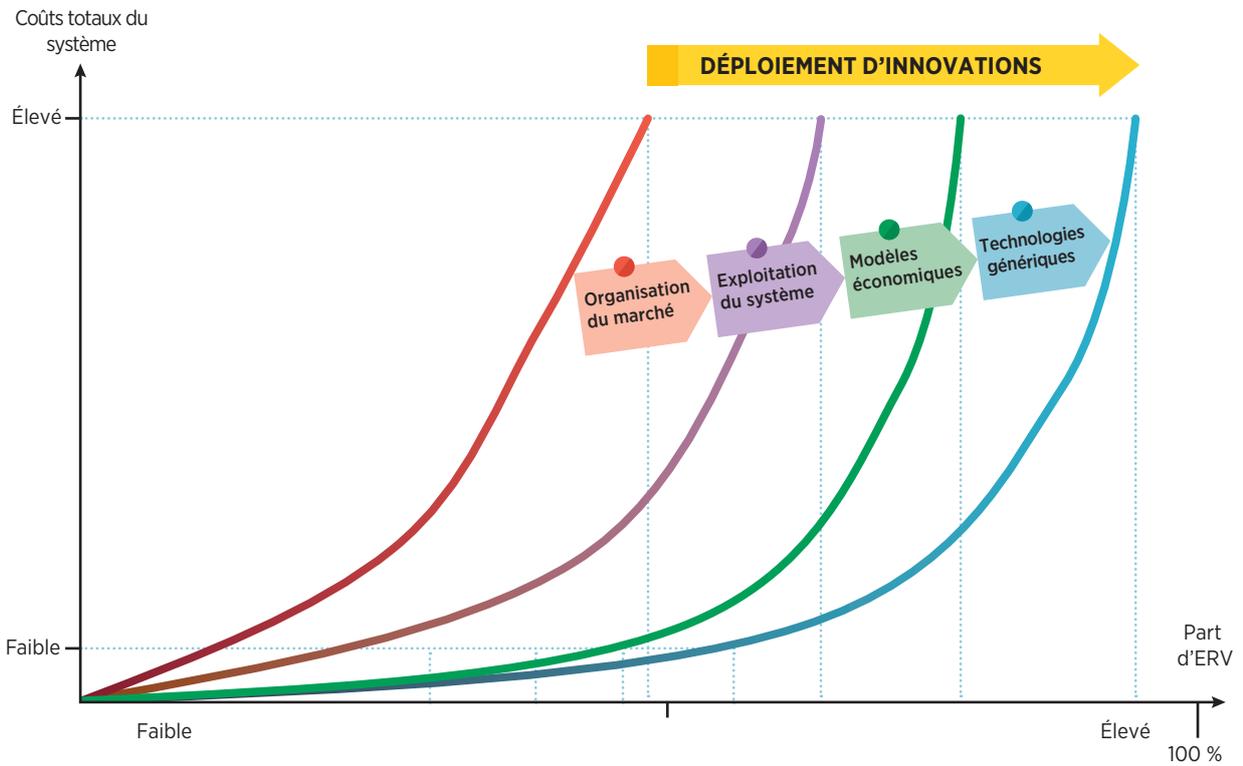
Le rapport montre que ***l'innovation en matière de systèmes électriques peut réduire les coûts liés à l'intégration des ERV grâce à des solutions augmentant la flexibilité du système.*** Ce concept est illustré par la Figure S11. La référence est un système comportant une faible proportion d'ERV et des contraintes importantes rendant difficile l'augmentation de cette part. La mise en œuvre de solutions de flexibilités permet de déplacer la courbe des coûts vers la droite de la Figure, ce qui signifie que, pour le même niveau d'investissement, une plus grande part d'ERV peut être atteinte tandis que les solutions sont mises en place. L'organisation du marché et l'exploitation du système présentent des coûts de mise en œuvre inférieurs et constituent un bon départ pour les décideurs politiques. D'autres solutions basées sur de nouveaux modèles économiques et sur les technologies génériques nécessitent l'engagement d'intervenants plus nombreux, ainsi qu'un investissement plus élevé, mais elles débloquent une plus grande flexibilité des systèmes.

Néanmoins, comme indiqué préalablement, une association d'innovations en matière d'organisation du marché, d'exploitation des systèmes, modèles économiques et technologies génériques est nécessaire pour atteindre un haut niveau d'intégration des ERV.

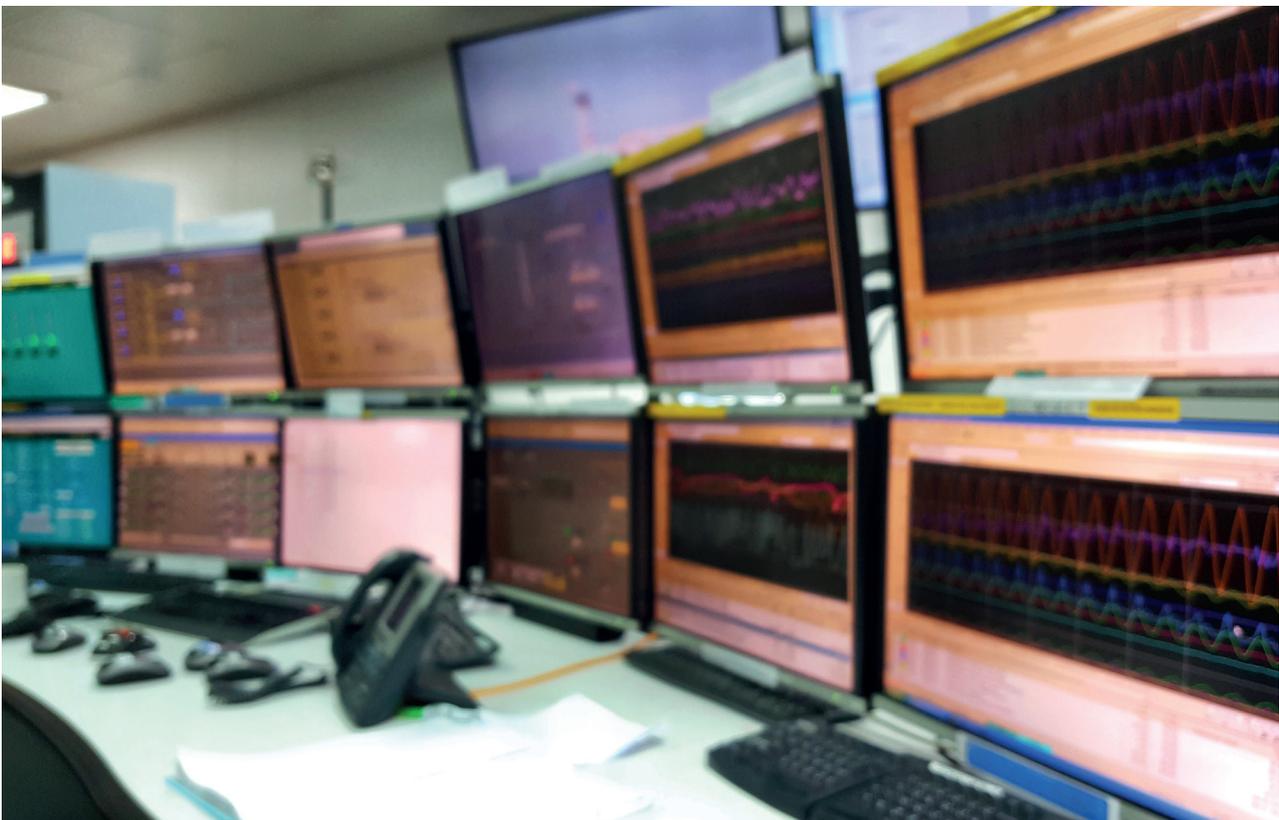
**Figure S10** L'innovation maximise les avantages du système



**Figure S11** Concept d'innovation réduisant les coûts totaux du système avec une part élevée d'ERV



**Plus vous mettez en œuvre des solutions innovantes, plus vous augmentez la part des ERV intégrées et plus vous réduisez les coûts du système**



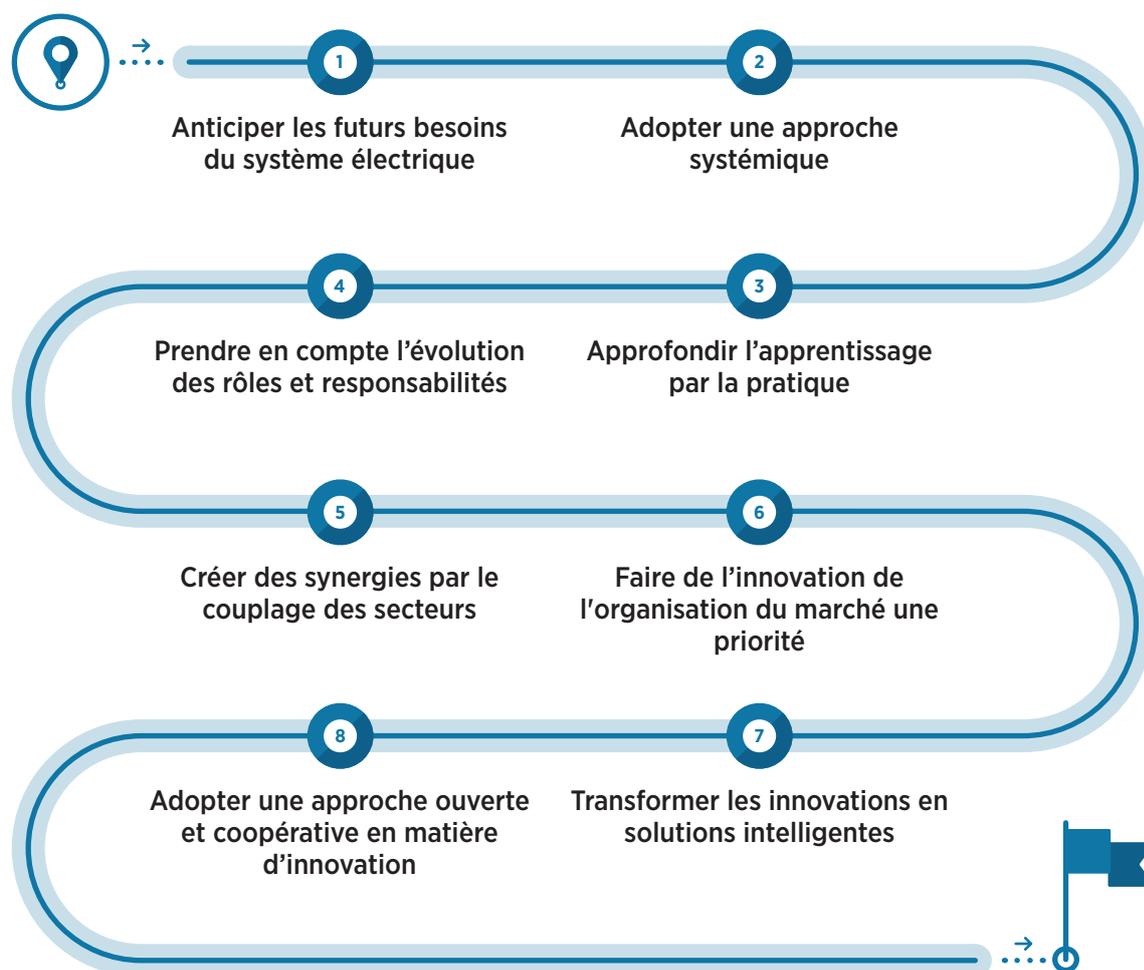
# VIII. PLAN D'INNOVATION EN HUIT ÉTAPES POUR LA TRANSFORMATION DU SECTEUR DE L'ÉLECTRICITÉ

Les systèmes électriques évoluent en raison d'impératifs stratégiques et d'une accélération de l'innovation. Le solide argument commercial des technologies ERV comme l'éolien et le solaire photovoltaïque les place au cœur de cette évolution. Les innovations testées dans les pays leaders dans le domaine montrent que les systèmes électriques peuvent fonctionner avec une grande proportion d'ERV, de manière fiable et rentable. Cependant, un écart considérable existe entre les pays leaders et la majorité des autres pays qui commencent à peine à intégrer les ERV. Tandis que le secteur privé continue à trouver de nouvelles solutions pour accélérer la transition énergétique, les gouvernements ont un rôle essentiel à jouer afin d'encourager et guider le secteur dans la réalisation de ses objectifs socio-économiques nationaux. Pour réduire cet écart, les mesures recommandées ci-après devraient être mises en œuvre par les pays souhaitant maximiser les avantages des énergies renouvelables pour leur économie (Figure S12).

**1 Développer des cadres stratégiques clairvoyants qui anticipent les futurs besoins des systèmes électriques.** Assurer l'intégration rentable des ERV à grande échelle nécessite d'équilibrer les besoins actuels (privilégier le déploiement des technologies de production d'électricité renouvelable) et les besoins futurs (intégrer une proportion élevée d'ERV). Il existe des compromis difficiles entre les solutions rapides et les stratégies sur le long terme. En visant un niveau élevé de déploiement et d'intégration des énergies renouvelables, les décideurs politiques ne doivent pas envisager uniquement les solutions rapides. Ils doivent anticiper la période à laquelle le déploiement des énergies renouvelables sera effectif et concevoir les marchés et les systèmes en se projetant dans ce futur.

**2 Adopter une approche systémique en réunissant les innovations technologiques, l'organisation du marché, les modèles économiques et l'exploitation du système électrique.** Il est essentiel d'optimiser les synergies entre les innovations à travers tous les secteurs et composants du système, en impliquant toutes les parties prenantes. Les solutions innovantes faisant l'objet de ce rapport montrent que des solutions adaptées au contexte et aux besoins d'un pays peuvent être élaborées en associant des innovations en matière de technologies génériques, d'organisation du marché, d'opérations des systèmes et de modèles économiques. Mettre en œuvre ces innovations afin d'améliorer la flexibilité de tout le secteur de l'électricité permettrait de réduire les coûts d'intégration des ERV et d'encourager la transition énergétique. Des synergies potentielles entre les différentes solutions existent déjà, et peuvent permettre de diminuer les investissements lorsqu'elles sont mises en œuvre ensemble.

**3 Encourager l'apprentissage par la pratique au travers d'essais et de démonstrations en continu.** Nous ne sommes pas en mesure de prédire quel sera le système électrique du futur. L'innovation implique nécessairement l'échec, toutefois cette notion n'a pas sa place dans le domaine des systèmes énergétiques. L'approvisionnement en électricité doit être assuré et nous avons besoin de déterminer quelles sont les solutions adaptées à chaque pays. C'est pourquoi l'apprentissage par la pratique, au travers d'essais et de démonstrations, est d'une importance cruciale pour réduire les risques. La capacité des différents intervenants à prendre des risques est variable : les start-ups (par exemple, les

**Figure S12** Plan d'innovation en huit étapes pour la transformation du secteur de l'électricité

nouveaux acteurs arrivant sur le marché) peuvent se permettre de prendre plus de risque et d'échouer. Par conséquent, une approche ouverte en termes d'innovation est importante pour permettre aux start-ups de résoudre les problèmes et d'apporter des solutions. La sphère réglementaire devrait permettre ce genre de pratique où l'expérimentation est nécessaire. La création de « bancs d'essais réglementaires » (« regulatory sand boxes ») permettrait, par exemple, aux intervenants d'expérimenter et de tester des innovations sans être limités par le cadre réglementaire.

- 4 Prendre en compte l'évolution des rôles et responsabilités dans l'exploitation du système électrique.** La pénétration croissante des ressources d'énergie décentralisées et l'émergence de nouveaux acteurs sur le marché, comme les « prosommateurs » et les consommateurs actifs, inaugurent une nouvelle ère. Les gouvernements et les entreprises doivent recueillir des

informations plus précises concernant les besoins et attentes des consommateurs et des communautés, ainsi que leur volonté d'adopter certaines innovations. Ils doivent ensuite concevoir des solutions sur mesure en fonction de ces informations. Certains consommateurs voudront probablement jouer un rôle actif dans le secteur de l'énergie, mais les avantages doivent être clairs, et l'automatisation est nécessaire afin de simplifier les réponses. Par ailleurs, les gestionnaires du réseau de distribution devront modifier leur rôle actuel et transformer leur modèle économique. Ils n'auront plus seulement un rôle dans la planification du réseau de distribution, mais seront amenés à jouer un rôle dans l'exploitation du système électrique. Une plus grande coopération avec les gestionnaires du réseau de transmission est nécessaire afin d'augmenter la visibilité des nouvelles ressources énergétiques connectées au réseau de distribution qui peuvent fournir des services au système entier.

**5 Faire de l'innovation en matière de réglementation et de l'organisation du marché une priorité, car cela favorise la flexibilité à un coût relativement peu élevé.**

Il a été prouvé que les solutions d'organisation du marché pour les ERV ont un impact élevé et à moindre coût, ce qui fait d'elles une option à considérer en premier lieu. Certains marchés et certaines réglementations montrent comment les marchés peuvent être adaptés pour refléter les besoins des systèmes électriques avec une proportion élevée d'ERV et pour répondre aux tendances en matière de numérisation, de décentralisation et d'électrification. On constate sur les marchés que la valeur évolue : au lieu de fournir des kilowattheures, elle fournit de la flexibilité pour faciliter davantage l'intégration d'ERV à faible coût. Tout cela repose sur un marché qui permet aux prix de rémunérer de manière appropriée l'énergie, les services d'équilibrage, et plus généralement, tous les intervenants capables de fournir de la flexibilité. Une planification adéquate prenant en compte la transformation de l'énergie donne lieu à des marchés holistiques et rentables. À l'inverse, les solutions basées sur des effets rapides et une approche de colmatage d'urgence entraînent sur le long terme des coûts élevés liés à l'exploitation du système. Une amélioration progressive des tarifs du marché de l'énergie est essentielle, indépendamment des solutions de colmatage d'urgence à court terme qui pourraient être adoptées.

**6 Créer des synergies entre un approvisionnement en électricité renouvelable et le transport, le chauffage et le refroidissement électriques.**

Il existe des synergies précieuses à exploiter entre les énergies renouvelables et la décarbonisation des secteurs d'utilisation finale par le couplage des secteurs (« sector coupling »). Les stratégies d'électrification doivent être planifiées avec soin et mises en œuvre judicieusement, en relation étroite avec les stratégies permettant le déploiement accéléré des énergies renouvelables et en considérant des changements sociétaux plus vastes.

**7 Transformer les innovations en solutions intelligentes à l'aide des technologies numériques.**

Les innovations numériques (telles que l'intelligence artificielle, l'Internet des Objets, la technologie blockchain, etc.) commencent à avoir un impact significatif sur les systèmes

électriques, de plusieurs façons différentes. Les implications pour les modèles et les acteurs déjà établis, ainsi que les risques, ne sont pas encore entièrement compris. Les technologies existent, mais les applications intelligentes sont encore limitées. Les systèmes devraient davantage utiliser « l'intelligence » permise par les innovations numériques. D'autres secteurs industriels ont notamment mis en œuvre des technologies numériques dans leur (quasi) intégralité, ce qui permet d'obtenir des connaissances applicables au secteur de l'électricité. De nombreux projets pilotes et des déploiements de solutions numériques sont nécessaires dans un plus grand nombre de circonstances.

**8 Adopter une approche ouverte et coopérative en matière d'innovation.**

L'innovation requiert l'implication de différents acteurs des secteurs public et privé ainsi que des pays développés et en voie de développement. Le savoir et l'expérience doivent être plus largement partagés. Il existe une multitude d'occasions d'apprendre d'autres secteurs et de différents acteurs. L'interaction avec d'autres secteurs industriels considérés comme ne faisant pas partie du secteur de l'électricité peut être une excellente occasion de créer des synergies. L'innovation doit être associée à une approche durable et inclusive.

Le rapport montre qu'une multitude d'innovations pouvant faciliter l'intégration des ERV est actuellement mise en œuvre ou testée à travers le monde. Par ailleurs, de telles solutions peuvent être conçues sur mesure pour s'adapter aux besoins et situations de chaque pays. Des cadres stratégiques couvrant et encourageant l'adoption de solutions innovantes sont essentiels pour profiter pleinement des avantages des énergies renouvelables à faible coût.

Une transformation énergétique réussie nécessite que l'innovation fasse partie d'une panoplie complète de mesures comprenant des politiques liées à l'éducation et à la formation, à l'industrie, à la main-d'œuvre et aux investissements, entre autres. Munis des connaissances relatives aux options disponibles, les planificateurs du système énergétique et les décideurs politiques peuvent, en toute confiance, envisager et poser les bases d'un futur alimenté par les énergies renouvelables.

**ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS**

<b>CSP</b>	énergie solaire concentrée
<b>EnR</b>	énergies renouvelables
<b>ERV</b>	énergies renouvelables variables
<b>GRD</b>	gestionnaire de réseau de distribution
<b>GRT</b>	gestionnaire de réseau de transport
<b>IA</b>	intelligence artificielle
<b>IdO</b>	Internet des Objets
<b>IRENA</b>	Agence internationale pour les énergies renouvelables
<b>PV</b>	photovoltaïque
<b>P2P</b>	peer-to-peer
<b>RED</b>	ressources énergétiques distribuées
<b>STEP</b>	station de transfert d'énergie par pompage
<b>VE</b>	véhicule électrique
<b>V2G</b>	vehicle-to-grid

**UNITÉS DE MESURE**

<b>GW</b>	gigawatt
<b>MW</b>	mégawatt
<b>MWh</b>	mégawattheure
<b>TWh</b>	térawattheure
<b>an.</b>	année

**RÉFÉRENCES**

- COLTHORPE, A.** (2017), « Stem connects 1MW aggregated virtual power plant in Hawaii », *Energy Storage News*, [www.energy-storage-news/news/stem-connects-1mw-aggregated-virtual-power-plant-in-hawaii](http://www.energy-storage-news/news/stem-connects-1mw-aggregated-virtual-power-plant-in-hawaii).
- CON EDISON** (2016), « A smarter way to control your comfort », Con Edison, [www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-\\$85](http://www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-residential-customers/bring-your-thermostat-and-get-$85).
- EIRGRID AND SONI** (2018), *Annual Renewable Energy Constraint and Curtailment Report 2017*, EirGrid and System Operator for Northern Ireland, Dublin and Belfast, [www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Annual-Renewable-Constraint-and-Curtailment-Report-2017-Non-Technical-Summary-V1.pdf](http://www.eirgridgroup.com/site-files/library/EirGrid/Annual-Renewable-Constraint-and-Curtailment-Report-2017-Non-Technical-Summary-V1.pdf).
- ELIA** (2018), « Mise en service d'un 'datahub' commun à l'ensemble des gestionnaires de réseau pour soutenir la flexibilité électrique », [www.elia.be/-/media/files/Elia/PressReleases/2018/20180308\\_SYN\\_Persbericht\\_Datahub\\_FR.pdf](http://www.elia.be/-/media/files/Elia/PressReleases/2018/20180308_SYN_Persbericht_Datahub_FR.pdf).
- ENERGYSTOCK** (2018), « The hydrogen project HyStock », EnergyStock, [www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hystock](http://www.energystock.com/about-energystock/the-hydrogen-project-hystock).
- EPHA** (2018), « Press Release: Ongoing growth: heat pump sector continues its positive contribution to Europe's energy and climate targets », European Heat Pump Association, <https://www.ehpa.org/about/news/article/press-release-ongoing-growth-heat-pump-sector-continues-its-positive-contribution-to-europes-ene/>
- GOGLA** (2017), *Global Off-Grid Solar Market Report Semi-Annual Sales and Impact Data*, Global Off-grid Lighting Association, Utrecht, [www.gogla.org/sites/default/files/resource\\_docs/gogla\\_sales-and-impact-reporth12017\\_def.pdf](http://www.gogla.org/sites/default/files/resource_docs/gogla_sales-and-impact-reporth12017_def.pdf).
- IEA (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY)** (2018), *World Energy Outlook 2018*, OECD/IEA, Paris, p. 528.

- IRENA** (2018a), *Power System Flexibility for The Energy Transition. Part 1: Overview for Policy Makers*, IRENA, Abou Dhabi.
- IRENA** (2018b), *Renewable Power Generation Costs in 2017*, IRENA, Abou Dhabi, [www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017](http://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017).
- IRENA** (2018c), *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*, IRENA, Abou Dhabi, [www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA\\_Report\\_GET\\_2018.pdf](http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Report_GET_2018.pdf).
- IRENA** (2017a), *Renewable Energy Statistics 2017*, IRENA, Abou Dhabi.
- IRENA** (2017b), *Adapting Design to Shares of Variable Renewable Energy*, IRENA, Abou Dhabi.
- IRENA** (2017c), *Planning for the Renewable Future: Long-term Modelling and Tools to Expand Variable Renewable Power in Emerging Economies*, IRENA, Abou Dhabi.
- IRENA, AIE ET REN21** (2018), *Renewable Energy Policies in a Time of Transition*, IRENA, OCDE/AIE et REN21.
- McCONNELL** (2017), « SA's battery is massive, but it can do much more than store energy », ABC News, [www.abc.net.au/news/2017-12-05/yes-sa-battery-is-a-massive-battery-but-it-can-do-more/9227288](http://www.abc.net.au/news/2017-12-05/yes-sa-battery-is-a-massive-battery-but-it-can-do-more/9227288).
- QUARTZ AFRICA** (2018), « The global leader in pay-as-you-go solar power is downsizing to stay profitable », <https://qz.com/africa/1229170/mkopa-solar-lays-off-kenya-uganda-staff-as-it-restructures/>.
- NISSAN NEWSROOM EUROPE** (2018), « Nissan and Enel launch groundbreaking vehicle-to-grid project in the UK », <https://uk.nissannews.com/en-GB/releases/release-145248-nissan-and-enel-launch-groundbreaking-vehicle-to-grid-project-in-the-uk?query=nissan+at+paris+motor+show+2014>.
- PICKEREL** (2018), « Urban Energy Solutions and SunGreen Systems will use Stem's AI solutions in solar+storage projects », [www.solarpowerworldonline.com/2018/09/urban-energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solarstorage-projects/](http://www.solarpowerworldonline.com/2018/09/urban-energy-solutions-and-sungreen-systems-will-use-stems-ai-solutions-in-solarstorage-projects/).
- RTE** (2018), « Denmark on track to have 50% renewable energy by 2030 », [www.rte.ie/news/news/2018/01/11/932573-denmark-wind-farm/](http://www.rte.ie/news/news/2018/01/11/932573-denmark-wind-farm/).
- SOLSHARE** (2017), « Step by step », [www.me-solshare.com/how-it-works/](http://www.me-solshare.com/how-it-works/).
- STATISTA** (2018), « Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025 (in billions) », [www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/](http://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/).
- NCUCCC** (2018), *ME SOLshare: Peer-to-Peer Smart Village Grids in Bangladesh*, Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, <https://unfccc.int/climate-action/momentum-for-change/ict-solutions/solshare>.
- WANG** (2017), *Ancillary Services: An Introduction*, CNREC, <http://boostre.cnrec.org.cn/index.php/2017/09/14/ancillary-services-an-introduction/?lang=en>.



# PANORAMA DES INNOVATIONS POUR UN AVENIR ALIMENTÉ PAR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES : SOLUTIONS POUR INTÉGRER LES ÉNERGIES RENOUVELABLES VARIABLES

© IRENA 2019

**Siège social de l'IRENA**

P.O. Box 236, Abou Dhabi  
Émirats arabes unis

[www.irena.org](http://www.irena.org)

