

# LES CARNETS DE DUBAÏ

Les Energies Renouvelables 2.0  
dans les territoires de demain

Think Tank « Connecter les  
Esprits »

  
**FRANCE**  
EXPO 2020 DUBAI





# SOMMAIRE

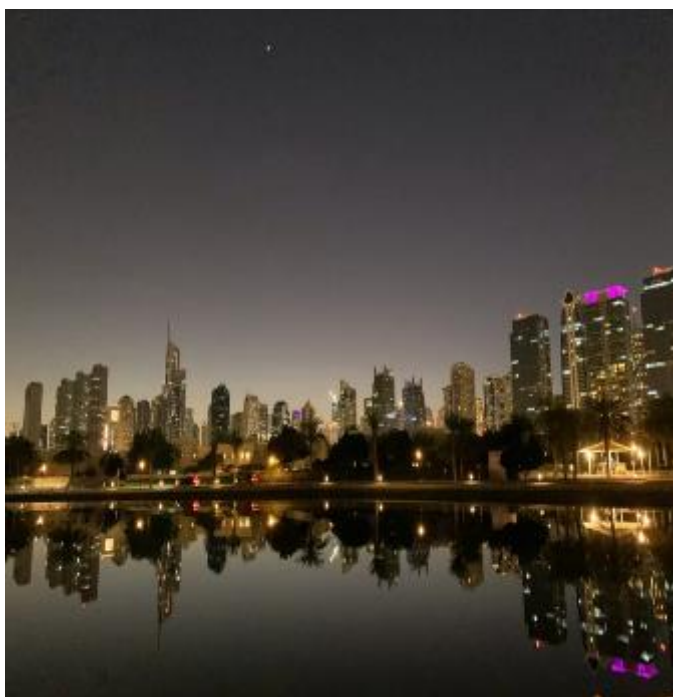
<i>Introduction.....</i>	<i>6</i>
<i>I. Les energies renouvelables : multiples, competitives et complémentaires ....</i>	<i>8</i>
<i>II. Des limites à l'essor des renouvelables sans cesse repoussées grâce au stockage, à l'intelligence des réseaux et à la production de nouveaux combustibles .....</i>	<i>16</i>
<i>III. Une dynamique globale ancrée dans les territoires .....</i>	<i>23</i>
<i>IV. Mise en perspective avec la crise de la Covid 19.....</i>	<i>28</i>
<i>Conclusion.....</i>	<i>32</i>
<i>Remerciements.....</i>	<i>33</i>

#01

LES CARNETS DE DUBAÏ

4

## AVANT PROPOS



***Verbatim Olivier Paquier :** Alors que les visions de l'avenir sont souvent assombries par des menaces diverses pesant sur le futur de l'humanité, comme l'illustre la crise sanitaire de 2020, les énergies renouvelables offrent à tous l'occasion de penser le XXIème siècle avec confiance : leur essor, qui n'en est aujourd'hui qu'à ses prémices, va changer le monde d'une façon encore à peine entrevue. Grâce à leurs progrès constants et à leur diffusion rapide, que nombre d'entreprises françaises développent déjà avec succès, il deviendra possible bientôt de tout changer : changer les territoires, changer les villes, changer les déplacements, changer les vies elles-mêmes sans pour autant renoncer à vivre pleinement, à voyager, à investir, à travailler, à consommer et à se divertir. Les énergies renouvelables tracent enfin pour tous et les générations futures un avenir désirable. Ce carnet de Dubaï, fruit d'un travail collectif, tente d'en préciser les contours et de montrer comment y contribuent dès à présent nombre d'entreprises françaises.*

La prise de conscience des dérèglements climatiques a fait d'énormes progrès. Mais n'est-ce pas déjà trop tard ?

Cette prise de conscience a certes fait des progrès considérables ces deux dernières années et elle est aujourd'hui mondiale. De fait, les catastrophes météorologiques se multiplient sur tous les continents. Il devient de plus en plus difficile de ne pas y voir la patte d'un changement climatique mondial. Et d'autres alertes sur l'environnement, à commencer par l'effondrement de la biodiversité et même de la masse animale sauvage, sont venues renforcer les inquiétudes. Si elles peuvent avoir de multiples causes, beaucoup sont dues aux activités humaines. Les gouvernements, unis en 2015 à Paris pour la COP21, se divisent aujourd'hui entre ceux qui prennent la menace très au sérieux, avec notamment la nouvelle Commission Européenne et la nouvelle administration des Etats-Unis d'Amérique, et ceux qui font encore mine de ne pas y croire, ou sont trop pris par d'autres sujets. Le 15 mars 2019, à l'appel de Greta Thunberg, des millions d'étudiants ont manifesté dans 120 capitales – du jamais vu. L'opinion se fait exigeante.

Mais n'est-ce pas déjà trop tard ? Les scientifiques alertent : le « budget carbone » sera bientôt épuisé pour maintenir le réchauffement mondial au-dessous de 2°C, et plus vite encore pour rester près de 1,5°C. Les émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, qui avaient paru stabilisées pendant deux ou trois ans, sont reparties à la hausse en 2018 et 2019. Certes, la pandémie de 2020/2021 et les confinements ont cassé cette reprise, mais pour combien de temps ? Certains changements pourraient perdurer - recours accru au télétravail, moindre utilisation de l'avion. Mais ce sera loin d'être suffisant. Pour beaucoup, la cause est entendue : il n'est plus temps, car pour atteindre les objectifs fixés il faudrait arriver à réduire chaque année les émissions de pourcentages sans précédent et donc irréalistes. Bref, 30 ans seront bientôt perdus – la Convention sur les changements climatiques fut signée à Rio en 1992.

Et s'il restait un atout, certes pas suffisant à lui tout seul, mais très important quand même ? Et si cet atout, c'était les énergies renouvelables, biomasse, éolienne, hydroélectrique, solaire, géothermie, énergie marine, potentiel énergétique lié à la valorisation des déchets ? Rien n'a-t-il été fait ? Mais si : par la recherche, le développement et surtout le déploiement sur le terrain, leurs coûts ont été réduits de façon stupéfiante, surtout pour les « petites nouvelles », l'éolien et le solaire. Le solaire photovoltaïque, neuf fois moins cher aujourd'hui qu'il y a dix ans et l'éolien, presque quatre fois moins cher d'après la Banque Lazard – sans doute un peu moins à terre mais plus encore en mer, l'éolien offshore étant une ressource considérable en Europe, mise en relief par l'Agence Internationale de l'Energie.

Il est vrai que l'on parlait de haut. Certains regrettent encore l'argent dépensé, devant l'apparente minceur du résultat atteint en 2020 : 7% de l'électricité mondiale pour l'éolien, 2% seulement pour le solaire. Et au cours de ces mêmes dix ans, le nucléaire a reculé ; de ce fait, l'essor des renouvelables n'a pas encore réduit les émissions de CO<sub>2</sub> qui viennent de la production d'électricité – 40% du total.

Oui mais... l'éolien et le solaire, qui figuraient parmi les énergies les plus chères il y a dix ans, figurent désormais parmi les moins chères. Souvent moins chères que l'énergie des centrales à gaz ou au charbon, parfois moins chères même que le seul coût du combustible fossile : le maintien en fonctionnement des centrales à charbon existantes n'est par exemple déjà plus rentable en Europe.

### Les énergies renouvelables : notre avenir

Le professeur Michael Grubb du Collège Universitaire de Londres a mis cela en image, celle d'une courbe « logistique » ou simplement « courbe en S » de pénétration d'une technologie nouvelle, appelée à remplacer les technologies existantes.

Dans cette courbe, qui s'écrit par une formule mathématique unique et simple, trois phases se distinguent : une lente maturation, puis un déploiement explosif, enfin un ralentissement.

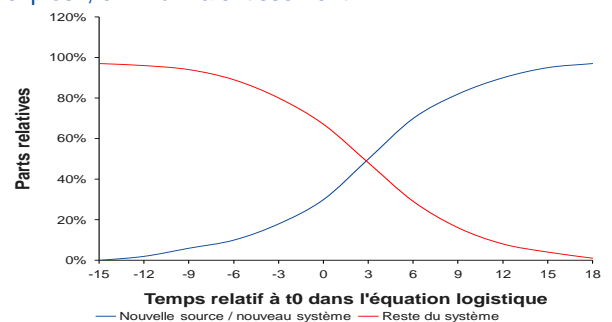


Figure 1 - Courbe de pénétration d'une technologie nouvelle de Michael Grubb

Dans le cas des renouvelables, la première phase vient d'être dépassée – celle d'un lent déploiement, parce qu'il fallait aider financièrement ce développement.

La seconde phase a été amorcée, celle d'un déploiement « explosif » - exponentiel en fait. Une telle réduction d'utilisation des combustibles fossiles est-elle « sans précédent » ? Non, les émissions françaises de CO<sub>2</sub> ont par exemple baissé de 30% en 9 ans, entre 1979 et 1988, sous l'effet de la montée en puissance du programme électronucléaire.

Enfin, demain, la troisième phase sera atteinte, celle du ralentissement avant d'achever la substitution. Peut-être sera-t-il alors plus difficile de remplacer le gaz et le charbon dans la production électrique, du fait de la

variabilité du solaire et du vent : le solaire n'est pas là pour éclairer la nuit, le vent souffle quand il veut.

### Les limites des renouvelables sans cesse repoussées

Voici vingt ans, les gestionnaires de réseaux pensaient qu'il serait difficile d'en intégrer plus de quelques pourcents dans les réseaux électriques. Puis ils ont pensé qu'ils pourraient en intégrer 15%, puis 20%, puis...

Aujourd'hui, l'éolien et le solaire fournissent près de la moitié de l'électricité au Danemark, l'Irlande et la péninsule Ibérique ne sont pas très loin derrière. Les confinements - avec la baisse de la demande d'électricité globale mais le maintien total de la production du solaire et de l'éolien - ont mis en lumière ce qui se passera avec une proportion de renouvelables dans la consommation d'électricité accrue de près de 10 points qui sera normalement atteinte dans une dizaine d'années : sauf en Californie, pendant un instant, il n'y a pas eu de problème.

En pratique, il n'y a peut-être pas de limites – cela dépend en effet aussi de quelles sources « commandables » (à volonté), comme l'hydroélectricité, on peut disposer. Ou des capacités de stockages, comme les stations (hydroélectriques encore) de « transfert d'énergie par pompage » (STEP) que l'on peut développer. Ou des interconnexions entre réseaux voisins. Ou encore, de la flexibilité accrue dont peut faire preuve la demande d'électricité. Et enfin du stockage que les consommateurs d'électricité – entre-temps devenus pour certains des producteurs décentralisés – peuvent mettre à la disposition de tous, depuis le ballon d'eau chaude asservi aux signaux tarifaires jusqu'aux batteries des voitures électriques au garage.

Oui mais... l'électricité, si elle absorbe près de 40% de l'énergie « primaire », ne représente que 20% de l'énergie « finale », celle qui parvient aux consommateurs, entreprises ou particuliers. Or, ce sont bien toutes les émissions de CO<sub>2</sub> qu'il faut réduire puis pratiquement supprimer. Les indispensables économies d'énergie, la sobriété volontaire, ou la chaleur renouvelable (biomasse, géothermie, solaire, biogaz) n'y suffiront pas. La baisse des coûts de l'éolien et du solaire intervient à nouveau ici – via la poursuite de l'électrification de l'économie : des bâtiments, de l'industrie et des transports. Au-delà de l'augmentation « spontanée » du rôle de l'électricité dans les économies modernes, disposer de grandes quantités d'électricité renouvelable peu coûteuse invite à pousser davantage encore l'électricité, avec les pompes à chaleur, et les transports publics ou individuels de personnes et de marchandises.

Dans certains cas pourtant, l'électrification semble impossible : les bateaux, les avions, certains procédés industriels et peut-être les gros camions. Des combustibles restent nécessaires et peuvent parfois provenir du biogaz. Mais on peut aussi les produire grâce à l'électricité : en électrolysant de l'eau on produit de

l'hydrogène et divers produits riches en hydrogène. Certains, comme l'ammoniac, aujourd'hui base des engrais azotés, demain vecteur d'énergie, ne contiennent pas de carbone, leur combustion n'entraîne aucune émission de CO<sub>2</sub>. D'autres, comme le méthanol, un ingrédient majeur de l'industrie chimique, ou les hydrocarbures de synthèse, associeront hydrogène « renouvelable » et carbone issu de l'atmosphère, directement ou via la biomasse.

Cela peut sembler lointain, voire irréaliste ; si l'intégration d'énergies « variables » comme le solaire et le vent posera des difficultés pour entièrement « décarboner » les systèmes électriques répondant à 20% de la demande finale, ne sera-t-il pas encore plus difficile de les employer pour décarboner les 80% restant de la demande finale d'énergie, aujourd'hui obtenue principalement à partir de combustion fossile (transport, chauffage, industries lourdes, ...) ? Eh bien non, c'est même plutôt l'inverse. En effet, la production d'hydrogène est éminemment flexible ; on peut l'interrompre lorsque la production d'énergies variables peine à rencontrer la demande d'électricité. Au total, en ajoutant aux consommations d'électricité d'aujourd'hui de nouvelles consommations flexibles comme celles-ci, on facilitera l'intégration des énergies variables comme l'éolien et le solaire.

On pourra aussi stocker de l'hydrogène pour de longues durées dans des cavités souterraines salines, ou importer des produits riches en hydrogène depuis des contrées très largement pourvues en énergies éoliennes et solaires, pour parer aux « pointes » de consommation. L'Allemagne, le Japon, les Pays-Bas, ont déjà fait connaître leur intention d'importer de l'énergie renouvelable sous ces diverses formes, tandis que d'autres, l'Australie, le Chili ou le Maroc, et certains pays du Proche-Orient, estiment être en mesure d'exporter des surplus dont ils n'auraient pas l'usage.

Les optimistes comme les pessimistes pensent que le monde...est le meilleur des mondes possibles. Les premiers ne voient pas la nécessité de le changer, les seconds estiment que c'est juste impossible. Il faut simplement être réaliste et limiter les dérèglements climatiques autant que possible : cela peut encore se faire dans une large mesure. Ce n'est sans doute pas un hasard si tous les grands exercices de prospective énergétique convergent pour mettre en relief les économies d'énergie et les énergies renouvelables comme les principaux leviers pour répondre au défi des dérèglements climatiques tout en assurant la résilience et la sécurité énergétique de l'économie mondiale, et au passage contribuer largement à l'accès universel à l'énergie et à l'amélioration de la qualité de l'air.

C'est une « vision française » des énergies renouvelables que présente ce rapport avec la conviction que leurs développements contribueront à travers le monde entier à préserver l'avenir de l'humanité sur notre planète.

## I. LES ENERGIES RENOUVELABLES : MULTIPLES, COMPETITIVES ET COMPLEMENTAIRES

Pour accompagner leur croissance économique, la plupart des pays industrialisés ont mis en place, au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, des systèmes de production, de transport et de distribution d'énergie reposant sur une logique verticale et centralisée.

Selon ce modèle, l'énergie issue d'importantes unités de production (nucléaires, thermiques ou hydroélectriques) est injectée dans un réseau ayant vocation à la transporter, sur des distances importantes, depuis le point de production jusqu'au point de consommation.

Cette logique s'est imposée en raison des économies d'échelle obtenues par l'augmentation de la taille des systèmes et de l'absence de technologies disponibles à l'époque pour gérer efficacement des architectures décentralisées devant équilibrer en temps réel production et consommation.

Avec, d'une part, la révolution digitale et, d'autre part, l'émergence de nouvelles technologies de production d'énergie, il est désormais possible d'envisager des systèmes énergétiques reposant sur une logique beaucoup plus horizontale et décentralisée (les 4Ds : décarboner, décentraliser, digitaliser et diminuer - la consommation -).

Ce modèle peut s'appuyer sur des moyens de production de différentes tailles, pour répondre à la spécificité de chaque besoin. La multiplicité des points de production favorise une meilleure résilience<sup>1</sup> et la sécurité de l'approvisionnement. Enfin, ce modèle s'appuie sur des couplages intelligents de modes de production et d'usages complémentaires.

### A. Les énergies renouvelables : des projets adaptés à toutes les échelles

Les énergies renouvelables peuvent être produites par des unités de toute taille : de la petite installation sur une maison individuelle jusqu'aux centrales de taille industrielle alimentant des villes entières, en passant par les écoquartiers dans les pays de l'OCDE et les « mini-réseaux » en fonctionnement autonome dans des villages isolés, notamment dans les pays en développement où le réseau est majoritairement absent en secteur rural, ou dans les zones insulaires. Cette variété d'échelles est un atout : les technologies de production d'énergies renouvelables s'adaptent ainsi à la spécificité des besoins de consommation.

**L'énergie solaire** photovoltaïque, souvent qualifiée d'énergie répartie, peut être produite à petite échelle : par des modules ou des tuiles photovoltaïques sur le toit d'une maison. Cette solution offre une puissance de quelques centaines voire quelques milliers de watts. A grande

échelle, l'énergie solaire peut être produite par un immense champ solaire raccordé au réseau de transport. Cette solution fournit plusieurs centaines de mégawatts.

**L'énergie hydroélectrique** peut être produite par une petite turbine « au fil de l'eau » offrant une puissance de quelques dizaines de kilowatts, comme par un immense barrage avec réservoir et station de transfert d'énergie par pompage (STEP), dont la puissance peut dépasser le Gigawatt.

**L'énergie éolienne** peut être produite par de petits mâts escamotables (très adaptés aux zones tropicales soumises aux ouragans), avec des turbines de 100 ou 200 kilowatts ou par de grands parcs *offshore* composés de plusieurs dizaines de mâts portant chacun une turbine pouvant dépasser les 10 mégawatts.

**L'énergie biogaz** produite à partir de la méthanisation de déchets organiques ou de boues de stations d'épuration peut se concevoir tant à l'échelle d'un agriculteur, d'un quartier, d'une commune, d'un syndicat de communes, que d'une grande métropole.

On peut également citer **l'énergie issue des CSR** (Combustibles Solides de Récupération) : refus de tri qui n'ont plus de réelle valeur marchande, mais conservent un important pouvoir calorifique. D'ici 2025, la France s'est d'ailleurs donnée comme objectif de détourner des centres d'enfouissement 2,5 millions de tonnes de déchets pour les valoriser sous forme de CSR ce qui permettrait l'économie de l'émission de 880000 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>.

Ouvrant la voie à la décentralisation et la maîtrise locale des moyens de production, cette diversité d'échelles réduit la dépendance vis-à-vis des moyens centralisés, dont l'indisponibilité potentielle, du fait de leur taille, impacte fortement le réseau. Avoir la possibilité d'adapter la taille de l'installation au volume et au profil de charge d'un point de consommation donné permet par ailleurs de localiser la production au plus près de la demande et ainsi, de réduire les pertes de transport. Ces différentes solutions permettront à termes de créer des Territoires à Energie Positive.

### B. Un développement accéléré par de nouvelles technologies et une baisse des coûts

Les technologies continuent de se développer et permettent de réduire les coûts de revient de la production des énergies renouvelables et de permettre d'intégrer les équipements dans de nouveaux environnements.

<sup>1</sup>Capacité d'un système énergétique à continuellement résister aux variations de l'offre et de la demande pour fournir de l'énergie aux usagers du réseau.

Le fort soutien public initié au début des années 2000 en Europe a eu pour conséquence un effet d'échelle et une augmentation de la concurrence, qui ont conduit à une forte baisse des coûts de fabrication. En parallèle, le développement autour de l'énergie solaire a permis une nette amélioration des performances des systèmes au cours des dernières années. Le coût d'investissement au kilowatt-crête a ainsi diminué de 32% entre 2016 et 2019, pour atteindre un coût moyen de 800 €/kWc pour les centrales au sol de grande taille et 1100 €/kWc pour les modules sur bâtiments ou sur ombrière (RTE, 2019). Les prix sont dégressifs en fonction de la surface de panneaux installée et beaucoup plus dispersés à faible puissance : les installations individuelles à destination des particuliers sont ainsi de l'ordre de 1500 à 2500 €/kWc.

En moyenne, le prix de production de l'électricité photovoltaïque varie aujourd'hui entre 48 €/MWh et 85 €/MWh en France Métropolitaine, encore plus performante dans les pays qui bénéficient d'un ensoleillement plus favorable. Les projets au sol permettent un prix nettement plus bas que ceux sur bâtiment.

Quant à l'éolien, l'investissement est de l'ordre de 1 300 à 1 700 €/kW. Prix dans lequel il faut compter environ 100 €/kW de coût de raccordement au réseau. La puissance d'une éolienne classique varie entre 350 kW et 5 MW, les investissements d'un parc éolien peuvent donc s'élever à plusieurs dizaines de millions d'euros. Le prix de production de l'électricité de l'éolien conventionnel oscille entre 55 et 90 €/MWh. Il s'agit d'une énergie dont l'injection au réseau électrique est rentable et concurrentielle.



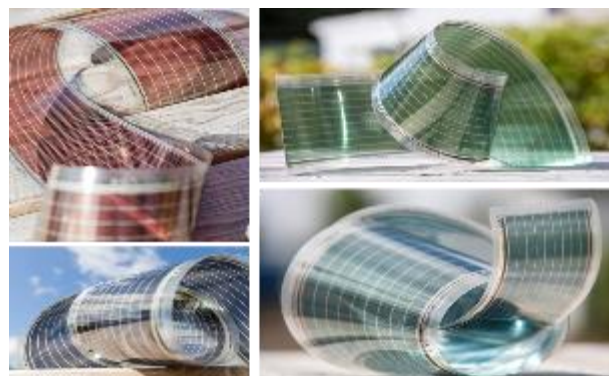
**Figure 2 - Eolienne flottante installée par BW Ideol.**

Sur le développement de l'éolien, avec l'émergence de l'éolien *offshore*, de nouvelles zones géographiques deviennent accessibles, avec des régimes de vent stables. Il s'agit alors soit d'installations « posées » à l'instar des projets qui verront prochainement le jour au large des côtes bretonnes ou normandes, soit d'installations « flottantes » dont le premier exemplaire a été implanté par BW Ideol (Figure 2). Quatre projets

pilotes sont également en cours de développement, dont deux en Méditerranée. La phase commerciale devrait être lancée au cours de l'année 2020.

Sur le solaire, les solutions de photovoltaïque surimposées ou intégrées au bâti se développent avec une grande diversité d'offres. De façon plus générale, les investissements en termes de R&D sont très importants et les innovations récentes montrent que les techniques d'hétérojonction ou à base de pérovskites ouvrent la voie à des augmentations de rendement très motivantes. Ces dernières peuvent d'ailleurs être produites en "roll to roll" et reproduites à grande échelle permettant une baisse significative des coûts.

C'est ce mode de production industrielle qu'ARMOR a mis au point pour la fabrication de films photovoltaïques organiques (OPV). Technologie pour laquelle elle développe des solutions d'intégration à l'enveloppe du bâtiment discrètes et esthétiques et pouvant prendre n'importe quelle forme. Ces applications ultra légères offrent la possibilité de s'adapter à tous types de supports,



**Figure 3 - Films OPV ASCA® du groupe ARMOR.**

à des usages nomades ou encore utilisées en intérieur car très sensibles à la lumière artificielle.

Par cette massification ARMOR ambitionne de répondre à l'industrialisation des travaux de rénovation énergétique telles que celle motivée par EnergieSprong. Cette démarche, initiée au Pays-Bas en 2012, entend accélérer le développement de rénovations à zéro énergie garantie en s'appuyant sur une logique de préfabrication et d'industrialisation.



**Figure 4 - Intégration de films OPV dans une isolation thermique par l'extérieur (réalisation de la filiale OPV d'ARMOR).**

## C. Des gisements d'énergie renouvelable immenses, à combiner et optimiser

Les énergies renouvelables permettent de profiter des ressources naturelles présentes, en abondance dans certaines régions.

Ainsi, grâce à la régularité et la constance des vents marins, les éoliennes en mer ont un niveau de production élevé. Une fraction croissante des installations nouvelles s'éloigne des côtes : 80% de la ressource éolienne se situe en effet dans des zones maritimes dont la profondeur est supérieure à 60 mètres. Dans ces zones, le recours à de nouvelles technologies d'éoliennes flottantes, c'est-à-dire installée sur une fondation flottante simplement reliée au fond marin au moyen de lignes d'ancrage, semble à privilégier. Le Golfe du Lion constitue, en Europe, le deuxième gisement en vent. Comme l'indique le rapport spécial de l'Agence Internationale de l'Energie de novembre 2019 « *Wind outlook 2019* », le potentiel de l'énergie éolienne *offshore* est énorme notamment en Europe où il représente à lui seul 12 fois la demande totale d'électricité de 2018.

Les côtes méditerranéennes étant particulièrement accores, plusieurs projets de parcs éoliens flottants sont en cours de développement. Le projet EOLMED (25 MW installés en Occitanie) en est un exemple : il s'appuie sur des éoliennes équipées d'une fondation flottante, elle-même développée par BW Ideol, entreprise française qui compte déjà plusieurs éoliennes flottantes dans le monde (France, Japon). De même, le projet EFGL porté par Engie et ses partenaires prévoit l'installation d'une ferme pilote éolienne flottante au large de Leucate – Le Barcarès à l'horizon 2022. La France bénéficie également de la complémentarité entre un ensoleillement variable suivant les régions, trois régimes de vent distincts et des ressources hydroélectriques concentrées dans les zones montagneuses ou le long des fleuves.

Dans d'autres régions du monde, la combinaison des énergies renouvelables est déjà une réalité, notamment au Cameroun, où les barrages hydroélectriques sont confrontés à la problématique de l'étiage. En faisant évoluer le mix électrique vers une combinaison d'énergie solaire et d'énergie hydroélectrique, on tire parti de leur complémentarité saisonnière : la production d'électricité d'origine solaire photovoltaïque est maximale durant la saison sèche et permet d'économiser l'eau dans les barrages – et réciproquement la production des barrages est maximale pendant la saison humide, tandis que l'énergie solaire est alors peu disponible.

Le projet solaire de Ngaoundéré (30 MW) développé par la Générale du Solaire, permettra ainsi des économies d'eau substantielles au barrage de Lagdo (72 MW), pour former au sein du réseau électrique du Nord du

Cameroun, un mix plus résilient et mieux adapté au rythme saisonnier.

La multiplicité des modes de production renouvelables permet d'assurer un mix intelligent et robuste. En comptant à la fois sur les ressources variables (l'éolien, le solaire...) et sur les ressources pilotables non intermittentes (la biomasse, la géothermie, l'hydroélectricité dans les pays sans saison sèche...).

Cette multiplicité permet d'assurer une sécurité d'approvisionnement, sous réserve d'en tirer pleinement parti en bâtissant un mix de production intelligent en intégrant l'ensemble des contraintes (disponibilité des différents moyens de production) et des prévisions (prévision de la demande, prévision météo, prévision de maintenance des moyens de production...) et de stockage et de flexibilité de la demande afin d'éviter le risque de black-out pour des raisons de déséquilibre entre l'offre et la demande d'électricité.

La digitalisation est, dans ce contexte, un complément indispensable à la bonne gestion de la production renouvelable.

## D. Le couplage intelligent : une condition impérative au développement des énergies renouvelables

On entend par « couplage » le fonctionnement de manière synchronisée de plusieurs modes de production ou de consommation. La multiplicité des énergies renouvelables permet des couplages intelligents à plusieurs niveaux :

**1. Entre les moyens de production renouvelables électriques**, c'est-à-dire l'installation sur un même site de plusieurs types de moyens de production fonctionnant de manière synchronisée. Ceci est notamment utile pour des installations hors-réseau alimentant des zones isolées. Par exemple, alimenter une antenne Telecom en groupant éolien & solaire, éventuellement avec une solution de stockage ou bien en l'hybridant avec un groupe électrogène servant de dernier recours. Pour la même raison, l'hybridation entre énergie renouvelable variable intermittente – éolien, solaire – et constante ou pilotable non intermittente est recommandé – géothermie, hydroélectricité ou méthanisation.

Couplage et hybridation tendent à optimiser les synergies et à mutualiser les coûts. Par exemple, il est pertinent d'installer des centrales solaires flottantes sur les lacs artificiels formés par les barrages hydroélectriques : d'une part, le raccordement au réseau peut être mutualisé ; d'autre part, il s'agit d'un couplage optimal entre énergie renouvelable intermittente (le solaire) et énergie renouvelable non intermittente (l'hydraulique).

**2. Entre les formes d'énergies**, c'est-à-dire exploiter la multiplicité des formes d'énergies produites en couplant par exemple énergie renouvelable électrique et thermique.

Certaines entreprises françaises sont positionnées spécifiquement sur l'exploitation de ces complémentarités, comme par exemple DualSun qui conçoit et fabrique des panneaux solaires hybrides à la fois photovoltaïques et thermiques.

**3. Entre l'offre et la demande**, de manière à adapter la production à la courbe de la demande et à adapter la demande à la variabilité – souvent prévisible – de la production. Il s'agit de répondre aux besoins évoluant au gré des saisons et des flux de personnes dans un endroit donné. L'objectif est aussi d'évoluer d'un système « à sens unique » – dans lequel la demande est considérée comme une donnée d'entrée – à un système « intelligent » – dans lequel production et consommation s'articulent pour assurer l'adéquation de l'une à l'autre.

A titre d'exemple, des entreprises françaises comme MyJouleBox ou Comwatt développent des outils de gestion permettant de piloter l'adéquation offre & demande de manière optimale, en intégrant des prévisions de production (météo) et de consommation par l'analyse des usages.

Des exemples concrets qui se diffusent déjà largement reposent sur le couplage du ballon d'eau chaude qui stocke l'excédent de production solaire à la mi-journée et augmente ainsi sensiblement le taux d'autoconsommation ou encore sur la proposition de décaler l'allumage du lave-linge à une plage horaire ultérieure pour laquelle un excédent de production électrique est anticipé.

A plus grande échelle, on peut citer l'exemple de Saint Nicolas de Glénan ci-dessous



**Figure 5** – EMS de EDF Store & Forecast à l'île de Saint-Nicolas des Glénan, © Frédéric Henry / ADV.

EDF Store & Forecast a équipé l'île de Saint-Nicolas des Glénan de son Système de Management de l'Energie (EMS) qui permet un pilotage optimisé et autonome des installations de production d'électricité et des flexibilités locales. L'île bénéficie ainsi d'une utilisation maximisée des énergies renouvelables locales ainsi que du maintien d'un équilibre offre/demande plus sûr car basé sur un mix énergétique varié (photovoltaïque, éolien, groupe électrogène) et divers moyens de stockage (batterie et stockage d'air comprimé). Après 6 mois de fonctionnement, l'EMS a permis d'obtenir des périodes

d'ilotage électrique, c'est à dire sans aucune consommation d'énergie fossile, 82% du temps et jusqu'à 6 jours d'affilée en septembre 2019. Le taux moyen de pénétration d'énergies renouvelables sur l'île a atteint 65% sur cette même période

**4. Entre production, stockage et réseau**, le stockage de l'énergie (dans le réseau ou le local) permet de gérer dans le temps l'adéquation entre la production et la consommation d'énergie. Les capacités de stockage agissent comme des tampons entre offre et demande. Pouvoir prédire la production et la demande permet d'optimiser au mieux l'utilisation des capacités de stockage (par exemple, en utilisant les batteries tôt le matin alors que les prévisions météorologiques permettent de prévoir un ensoleillement important en milieu de matinée qui permettra alors de les recharger).

Optimiser la production solaire, la consommation et le stockage permet d'apporter une réponse efficace à la demande croissante d'une électricité fiable, économique et durable.

A titre d'exemple, le groupe Générale du Solaire a réuni un consortium d'entreprises françaises et africaines pour développer et mettre en œuvre une solution intégrant plusieurs innovations dans les domaines des énergies renouvelables, des batteries et de l'optimisation énergétique.

Le projet, destiné à l'autoconsommation du supercalculateur de l'Université d'Abidjan, permet de réduire non seulement la consommation d'un groupe électrogène préexistant mais aussi, et de façon considérable, la facture énergétique ; cela tout en améliorant la fiabilité de l'alimentation ainsi que son empreinte environnementale.

C'est grâce au couplage intelligent de ces différentes technologies (PV, batteries, groupe électrogène) et à un pilotage à la fois de la consommation et de la production, que le projet offre une plus grande autonomie des installations électriques face à l'instabilité réseau des villes africaines.

Pour pousser au plus loin cette logique d'adéquation entre l'offre et la demande, le recours aux technologies de l'information et de la communication est une source de création de valeur. Il s'agit de tendre vers un « internet de l'énergie » en interconnectant via les réseaux les différents moyens de production et de consommation.. Ces réseaux jouent le rôle de dernier recours lorsque les sources locales ne produisent pas suffisamment. Ces réseaux jouent aussi un rôle d'optimisation à condition de s'appuyer sur les leviers d'intelligence offerts par la digitalisation (« smart grids »).

Toutes ces méthodes de couplages rendent compatibles la réduction de l'empreinte carbone et la logique de maximisation économique.

EXEMPLE – Différentes échelles pour le photovoltaïque



**Figure 6** - Réalisations photovoltaïques de nature collective ou individuelle (©n11 architekten gmbh).



**Figure 7** - Marché de Saint-Charles à Perpignan (Akuo) : La plus grande centrale photovoltaïque intégrée en toiture au monde à sa date de mise en service en 2011.



**Figure 8** - O'MEGA1, plus grande centrale de solaire flottant d'Europe (flotteurs Hydrelia® by Ciel et Terre) à sa date de mise en service en 2019. Sa production annuelle permet d'alimenter en électricité plus de 4373 foyers.

Etude sur les coûts de revient des énergies renouvelables

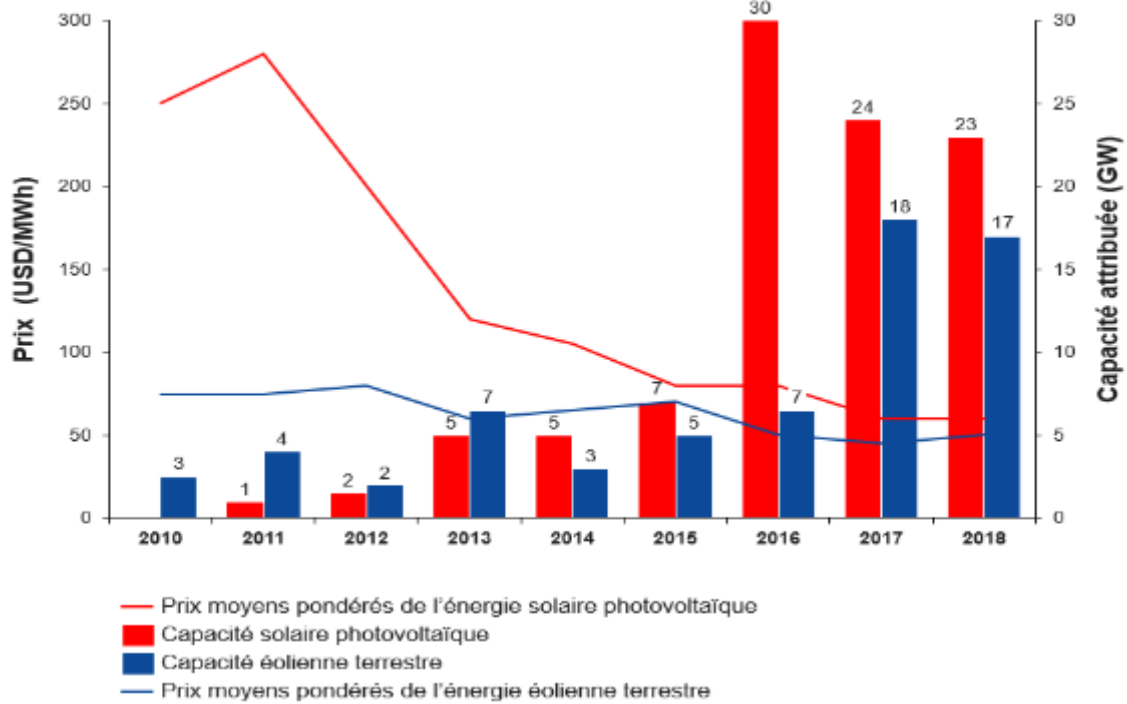


Figure 9 - Prix moyens pondérés globaux résultant des enchères, 2010-2018, et capacité attribuée chaque année.

Source : Base de données IRENA

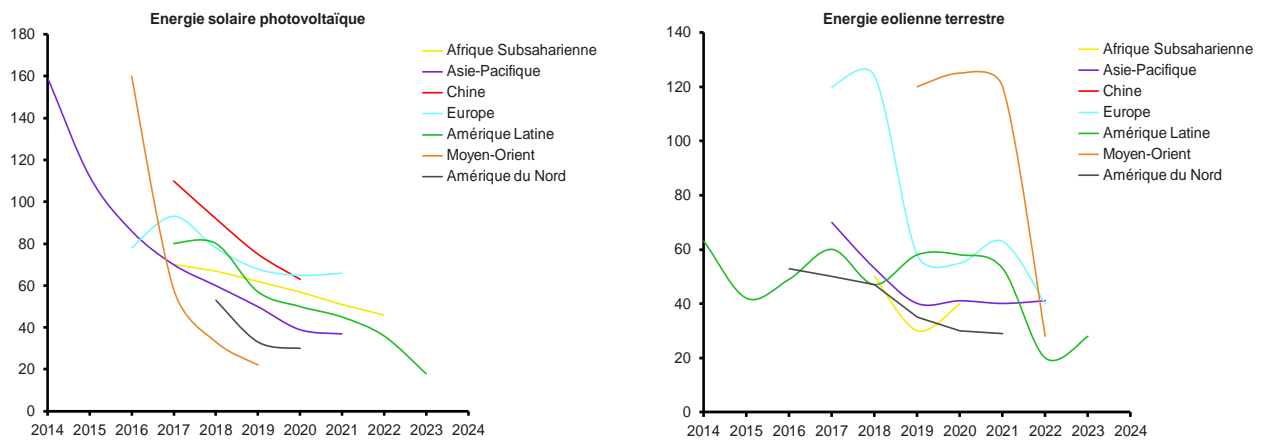


Figure 10 - Prix moyen des enchères par région et par date de commande pour l'énergie solaire et l'énergie éolienne terrestre.

Source : IEA 2019

**Prix moyens obtenus aux appels d'offres de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) d'énergie solaire et éolienne**

**Energie Solaire**

Une baisse des prix des appels d'offres d'énergie solaire a été observée de l'appel d'offres 4.1 jusqu'à l'appel d'offres 4.4, puis les prix se sont stabilisés autour de 61€/MWh (contre 68€/MWh en 2017).

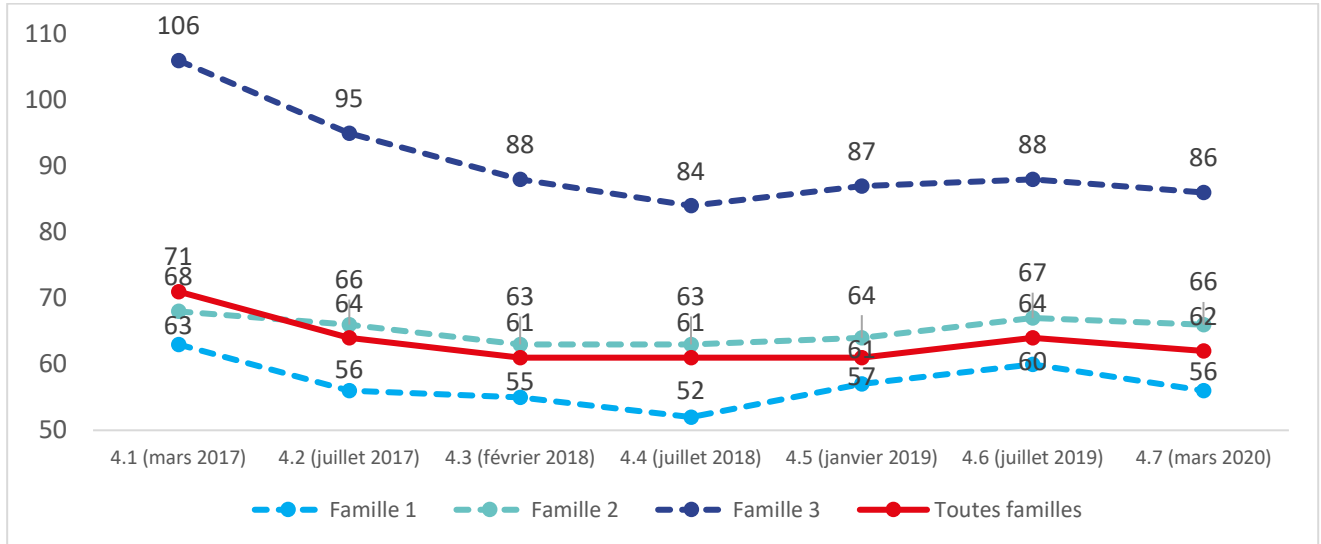


Figure 11 – Evolution des appels d'offres CRE 4. X d'énergie solaire en France (Sources : CRE, Engie).

**Energie éolienne**

Malgré un faible historique, les appels d'offres éoliens révèlent une baisse des prix sur la période 2017-2020, passant de 65,5€/MWh à 63€/MWh. Pour autant cette tendance est discontinuée en raison de conditions de souscription aux appels d'offres variables et d'une intensité concurrentielle par conséquent très différente d'une session à l'autre.

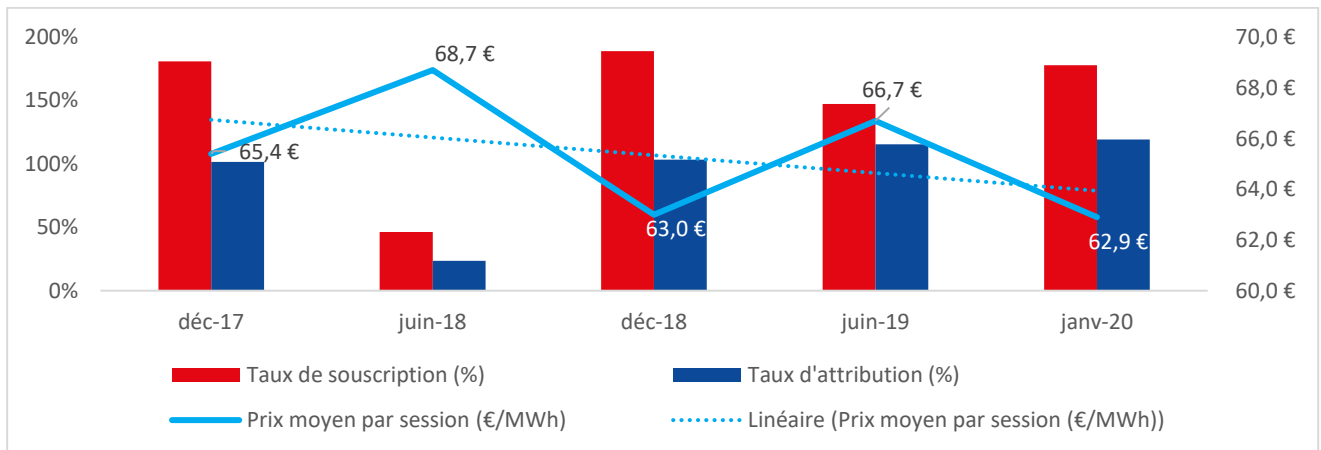


Figure 12 – Evolution des prix des appels d'offres CRE 1.X d'énergie éolienne en France (Sources : CRE, Engie).

## Evolution du Levelized Cost Of Energy (LCOE)

### Energie éolienne

L'ADEME évalue une baisse de LCOE sur la période 2008-2050 de 68€ en moyenne (de 88/119 €/MWh à 24/46 €/MWh en 2050), soit une baisse d'environ 2,6% par an. La courbe baissière entre 2008 et 2019 est plus importante que sur le reste de la période. Entre 2019 et 2050, la baisse annuelle moyenne du LCOE estimée est de 1,7% (-41% en 41 ans).

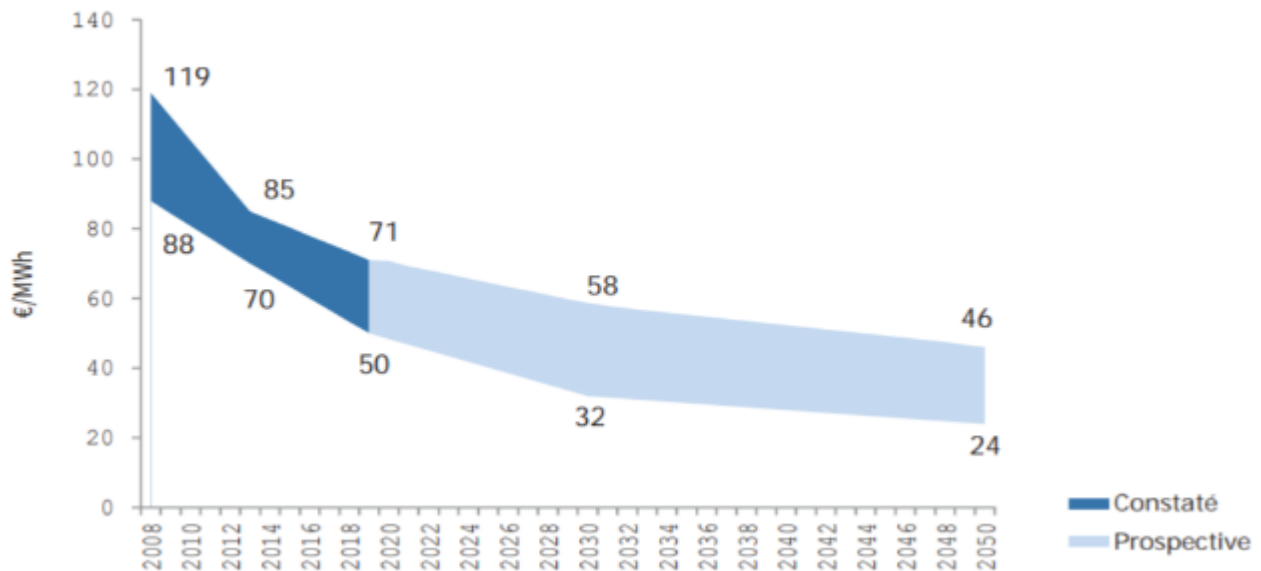


Figure 13 – Evolution du LCOE de l'éolien terrestre en France de 2008 à 2050 (Source : ADEME).

### Energie solaire

L'ADEME évalue une baisse de LCOE sur la période 2008-2050 de 545€ en moyenne (555/590 à 23/32 €/MWh en 2050), soit une baisse d'environ 7,5% par an. La courbe baissière entre 2008 et 2019 est plus importante que sur le reste de la période. Entre 2019 et 2050, la baisse annuelle moyenne du LCOE estimée est de 2,7% (-57% en 41 ans).

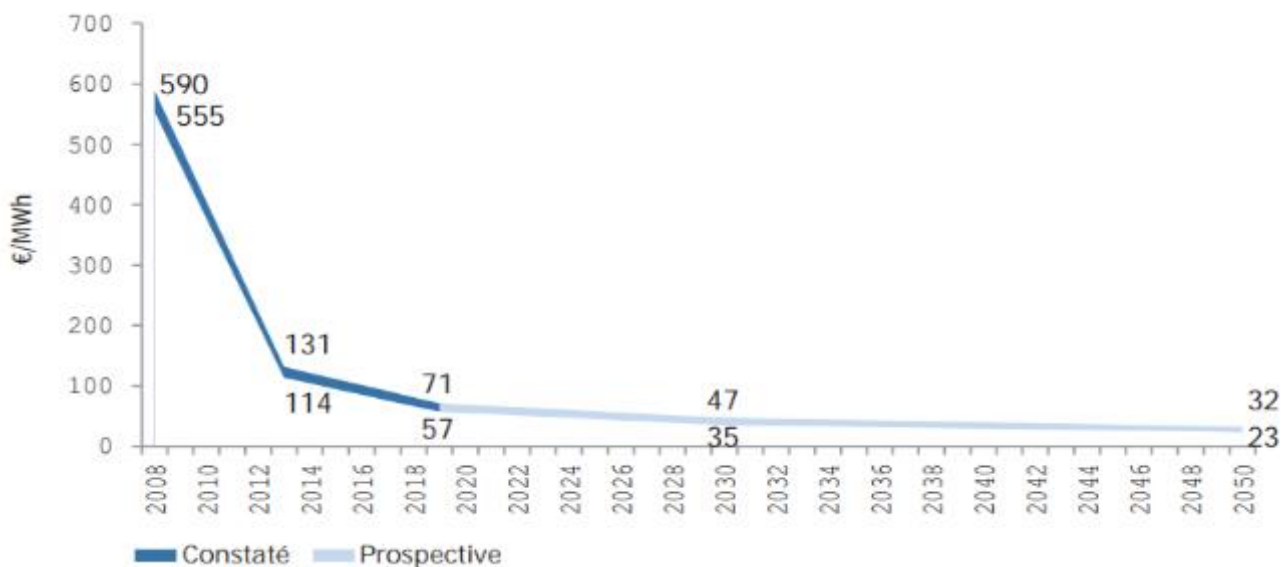


Figure 14 - Evolution du LCOE des centrales photovoltaïques au sol en France de 2008 à 2050 (Source : ADEME).

## II. DES LIMITES A L'ESSOR DES RENOUELABLES SANS CESSER REPOUSSEES GRACE AU STOCKAGE, A L'INTELLIGENCE DES RESEAUX ET A LA PRODUCTION DE NOUVEAUX COMBUSTIBLES

Afin d'équilibrer un réseau et de garantir l'équilibrage entre demande et production, des mécanismes de flexibilité, de la demande (par exemple quand de grands industriels arrêtent pour un temps donné leurs actifs les plus consommateurs d'énergie) peuvent être déployés plus largement. L'énergie peut aussi être stockée / redistribuée à un moment ultérieur, grâce aux technologies de stockage.

Le stockage permet ainsi de soulager le réseau électrique aussi bien en situation de surproduction que de sous production. En fonction de la nature des réseaux auxquels les moyens de stockage sont connectés, différents usages sont possibles :

- Dans le cas de grands réseaux, le stockage peut ainsi contribuer à différents services pour les gestionnaires de réseaux électriques tels que la fourniture de capacité, le maintien de la fréquence et de la tension, la gestion des pics de demande locaux par exemple évitant ainsi de forts investissements en infrastructure, etc... Il peut permettre de stocker de manière temporaire de très hauts niveaux de production issue d'énergies renouvelables et concourir ainsi à la protection de l'environnement et à la décarbonation du secteur de l'énergie.

- Dans le cas de systèmes électriques non connectés au réseau, le stockage est une solution qui permet de mettre en place des moyens de production renouvelables tout en augmentant la disponibilité de l'alimentation électrique.

- Par ailleurs, le stockage se retrouve aujourd'hui logiquement au cœur de l'essor de formes de mobilité durables.

- Enfin, la production de nouveaux combustibles à partir de sources d'énergies renouvelables introduit un degré de flexibilité additionnel considérable qui libère le potentiel de développement des renouvelables en ouvrant la voie à une conversion massive à l'électricité des transports de marchandises et des transports collectifs terrestres et maritimes. En outre, dans les cas où c'est possible, on pourra recourir au biogaz.

### A. Différentes technologies de stockage pour différents usages

Différentes solutions de stockage existent à des niveaux de maturité et de déploiement différents ; ces solutions sont complémentaires et permettent ainsi de couvrir les différents besoins, qui dépendent aussi du contexte.

Les caractéristiques déterminantes dans le choix d'une technologie de stockage sont les suivantes :

- **Délai de réponse.** Certaines applications, telles que la réserve de puissance, requièrent en effet la capacité de faire circuler l'énergie de manière quasi-instantanée. Ainsi, les batteries Li-ion et les supercondensateurs sont au compte des technologies pertinentes.

- **Capacité de stockage.** Le « *Time-shifting* » – soit le stockage des excès d'énergie produite pendant des périodes de faible demande afin d'être utilisée

ultérieurement – nécessite des capacités de stockage fortement variables, en fonction des usages. En effet, là où des besoins de stockage à l'heure ou à la journée peuvent être satisfaits avec des capacités relativement limitées, de plus longs time-shifts requièrent en revanche de très importantes capacités de stockage. Il est possible d'accroître les capacités de la plupart des technologies mais des considérations d'ordre économique expliquent les arbitrages.

- **Durée de stockage :** Il faut distinguer la capacité de stockage proprement dite, qui peut se mesurer en heures de fonctionnement à pleine capacité pour une puissance donnée, et donc in fine en multiples de kWh, et de l'autre la durée de stockage, le temps pendant lequel ces capacités doivent être maintenues. Une même capacité de stockage aura une économie très différente si elle est utilisée (chargée et déchargée) tous les jours ou deux fois par jour, ou si elle est chargée et déchargée une fois par an – de l'été à l'hiver ou l'inverse.

Pour des durées courtes, les batteries conviennent généralement. Mais il faut doubler le nombre de batteries pour en doubler la capacité de stockage. D'autres technologies peuvent disposer de réservoirs de grandes capacités moins coûteux, l'essentiel de leur coût résidant dans la transformation de l'électricité en un produit stockable et dans sa restitution sous forme d'électricité (énergie potentielle de la chute d'eau, énergie chimique de l'hydrogène par exemple). Il y a également des effets d'échelles : ainsi, un déploiement de solutions basées sur les STEP (transfert d'énergie par pompage), permet de réaliser des économies d'échelle. Par ailleurs, l'hydrogène permet d'augmenter sa capacité de stockage de l'énergie par la simple augmentation des dimensions de son réservoir, sans avoir à dupliquer le reste du système d'exploitation. Pour autant, si les stockages souterrains peuvent présenter un coût attractif, les stockages de dihydrogène liquide ou comprimé en surface sont plus coûteux, et on pourra également envisager une étape de transformation supplémentaire, par exemple vers l'ammoniac, en l'absence de possibilités souterraines.

Il faut également tenir compte de l'autodécharge. Les batteries Li-ion sont ainsi utilisées de préférence pour le stockage de courte durée en raison de la force de l'autodécharge qui les affecte au cours du temps. Le stockage à l'hydrogène et les batteries à oxydoréduction sont plus adaptés pour le time-shifting sur plus long terme, d'une saison à l'autre par exemple. Pour l'hydrogène, cette autodécharge est équivalente à une perte de la molécule durant le stockage. Cette perte est quasi nulle pour de l'hydrogène stockée sous pression dans des bouteilles ou des cuves. Les fuites dans des cavités géologiques restent limitées. L'hydrogène liquide est stocké dans des enceintes cryogéniques maintenues à -

253°C. Par échange thermique avec l'ambient, l'hydrogène liquide s'évapore partiellement et doit être évacué pour ne pas entraîner une surpression à l'intérieur du réservoir. Le taux journalier d'évaporation ou Boil-off est d'environ 0,5%. Ce mécanisme est plus faible pour l'ammoniac maintenu à une température beaucoup plus faible (-33°C) ou des molécules fortement hydrogénées comme l'alcool ou les hydrocarbures qui restent liquides à pression et températures normales (mais contenant du carbone).

## B. Des besoins différents par géographie

Des besoins de stockage différents en fonction des situations :

- Des réseaux isolés
- Des réseaux avec une forte pénétration des énergies renouvelables, sans solution d'équilibrage aisé
- Des réseaux avec une forte base installée pilotable avec une forte inertie

Apporter une solution technologique durable pensée pour répondre aux enjeux des sites isolés permet d'engager la transition énergétique de ces zones.

A titre d'exemple, le groupe Générale du Solaire réalise au Bénin un projet innovant de mini-réseaux solaires avec stockage (3,6 MWc/3,8 MWh) alliant accès à l'énergie et développement d'activités locales. Il s'appuie sur une technologie de pointe 100% renouvelable et des solutions intelligentes de comptage répliquable et accessible à tous. La vocation du projet dépasse les seuls enjeux d'accès à l'énergie en favorisant le développement économique local, notamment par des services électriques productifs.

En France, le besoin de flexibilité du système électrique est assuré à la fois par des unités de production pilotables (centrales thermiques, turbines à combustion, hydroélectricité éclusée et au fil de l'eau), par des solutions de stockage (hydroélectricité par lacs et stations de transfert d'énergie par pompage, dites STEP ; batteries) et par le pilotage de la consommation. Il est important de noter que le stockage est aujourd'hui, en France et dans le monde, quasi-exclusivement réalisé par une énergie : l'hydroélectricité

En 2019, EDF a inauguré un nouvel équipement de 240 MW sur le site de la STEP de la Coche située en Savoie (France). Il complète la centrale souterraine préexistante (inaugurée en 1976) et augmente sa puissance de 20%. L'investissement de 150 M€ confirme l'engagement du Groupe EDF en faveur du développement de l'hydraulique qui constitue la première des énergies renouvelables électriques dans le monde et représente 12,4 % de la production d'électricité en France. Avec cette nouvelle centrale, les aménagements hydroélectriques de La

La technologie dite du solaire à concentration (CSP) permet de stocker l'énergie sous forme thermique et de la restituer sous forme d'électricité lorsqu'il n'y a plus de soleil. Le projet de Noor Midelt (Figure 19) au Maroc, est un exemple d'utilisation de la technologie solaire à concentration : d'une capacité de 800 MW, ce projet constitue une première mondiale d'hybridation entre le CSP et le PV.



**Figure 15** – Site de la STEP de la Coche située en Savoie (France).

Coche vont désormais produire l'équivalent de la consommation annuelle de 270 000 habitants (soit la taille d'une ville comme Strasbourg) grâce à une énergie renouvelable, flexible et stockable.

Au regard des objectifs nationaux de développement des énergies renouvelables, RTE a estimé qu'à horizon 2035 un mix électrique composé à 50% d'énergies renouvelables, 46% de nucléaire et 4% de thermique nécessiterait des besoins de flexibilités accrus, qui seraient satisfaits, au regard de critères technico-économiques, par les centrales hydroélectriques, les interconnexions et les effacements de consommation.

Différentes études ont été menées sur l'évolution du besoin de flexibilité du système électrique français. Un état des lieux (2019) de la structure du parc de production en France montre que la puissance installée des énergies renouvelables variables (éolien et solaire), était de 25,9 GW en 2019, soit 19,2% de la puissance installée du parc, et qui concourt à 8,5% (45,7TWh) de la production d'électricité totale en France.

Les travaux réalisés récemment évaluent à l'horizon 2030 – 2035, un besoin de flexibilité additionnel pouvant atteindre la dizaine de GW, couvert par un gisement d'environ 1,5 GW pour le stockage hebdomadaire (constante de stockage supérieure à 24h), et de 2 à 6 GW pour le stockage par batteries (constante de 1 à 4h, en fonction du coût relatif de la technologie). Il est important de souligner la profonde diversité des solutions de stockage, induite par la pluralité des besoins, le plus souvent classifiés par les durées de charge requises (à l'heure, la journée, la semaine, le mois ou la saison).

De réelles opportunités de développement de nouvelles solutions de stockage sont cependant d'ores et déjà identifiées dans les zones non interconnectées (îles,

zones isolées) par les différents acteurs et sont en cours d'expérimentation en vue d'une ouverture des marchés (micro-réseaux isolés).

### C. Le stockage par batterie, en pleine croissance

Compte tenu de la baisse des coûts et de l'optimisation des performances des batteries lithium ces dernières années, la technologie s'impose désormais en masse sur les marchés (en particulier pour le marché de la mobilité électrifiée).

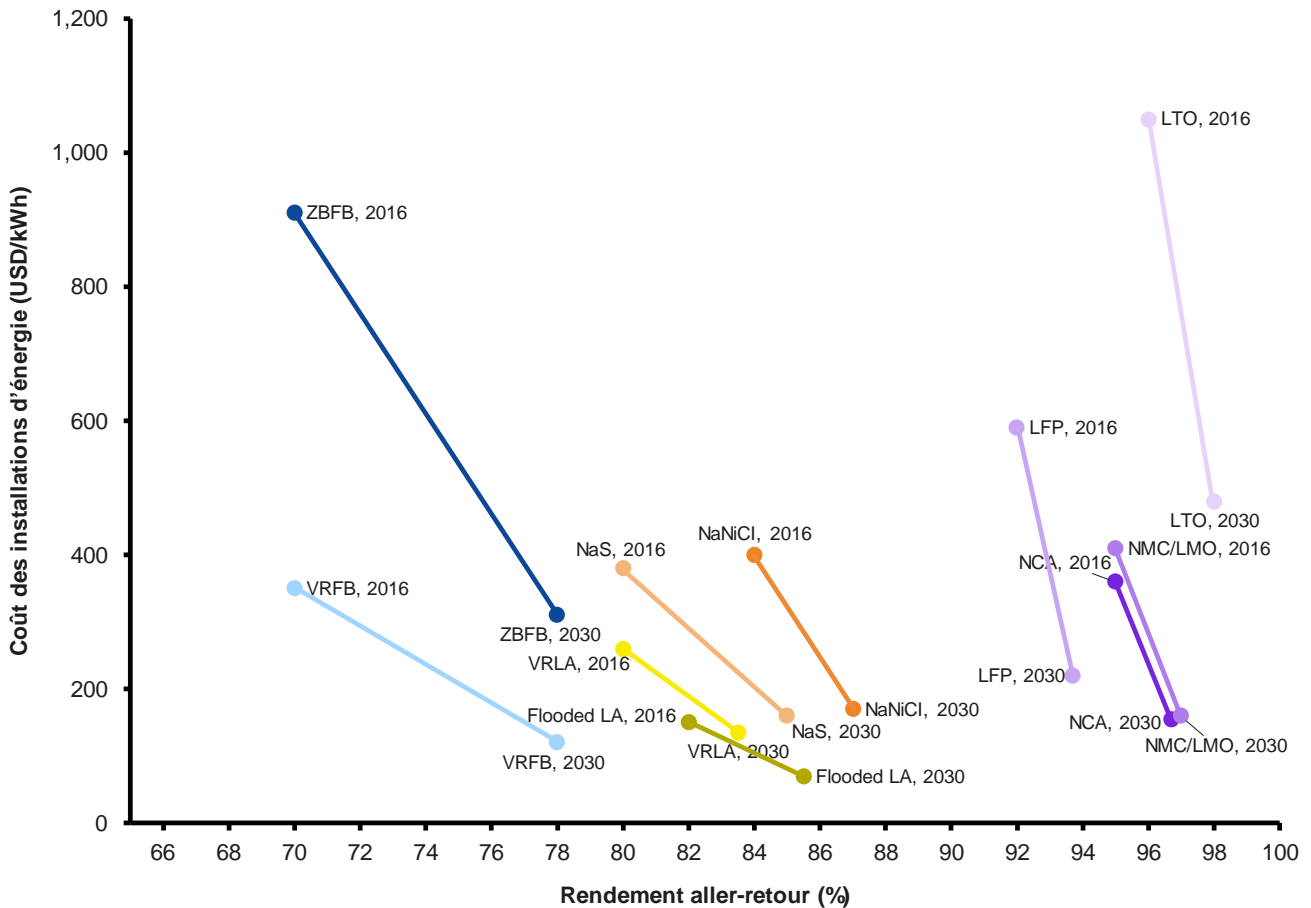


Figure 16 - Comparaison de 2016-2030 des coûts d'installation énergétique et rendement des technologies de stockage de batteries. Source : IRENA Electricity Storage Cost report 2017.

Les émissions de CO<sub>2</sub> associées au cycle de vie des batteries Li-ion font l'objet de nombreuses analyses du fait de leur développement récent pour les véhicules électriques. D'après les analyses de RTE, le cycle de vie de ces batteries dépend de façon significative de la localisation de l'étape de fabrication qui est consommatrice d'électricité. L'impact en émissions de gaz à effets de serre du cycle de vie des batteries Li-ion est 50 à 60 % plus faible dans l'hypothèse où l'étape de fabrication est située en France par rapport à l'hypothèse où l'étape de fabrication est située dans un pays où le mix de production électrique est fortement basé sur la production charbon (par exemple la Chine).

De nouvelles générations de batteries lithium dites « tout solide » devraient émerger sur le marché dès 2025, compétitives, encore plus sûres et plus performantes,

avec le positionnement d'acteurs européens (Saft, Northvolt, Blue solutions, ...) pour la fabrication des cellules en Europe (une initiative supportée par l'alliance européenne de la batterie lancée fin 2017).

Le marché du stockage stationnaire pourrait ainsi non seulement bénéficier de ces batteries neuves compétitives, mais aussi également réutiliser les batteries en fin de vie des véhicules électrifiés (qui comportent encore 70 à 80% de leur capacité initiale, une capacité suffisante pour satisfaire aux besoins du stationnaire, et une durée de vie résiduelle dépendant des technologies). Le stockage par batterie se fera donc par opportunité ces prochaines années, et un marché du stockage stationnaire pour les batteries s'installera progressivement.

Le développement du stockage par batterie est porté par une forte dynamique de baisse des coûts. Lazard estime le coût de stockage utilisant des batteries Li-ion :

- *Wholesale* (stockage d'énergie à grande échelle pour gérer des pics énergétiques) : 176-257 €<sup>2</sup> (204-298 \$) / MWh
- Transmission et distribution (capacité flexible et stabilité du réseau) : 226-405 € (263-471 \$) / MWh
- PV + stockage : 93-121 € (108-140 \$) / MWh

Commercial et industriel autonome (services de pointe et de réseau) : 713-990 € (829-1152 \$) / MWh (probablement le plus proche des applications de ville intelligente).



**Figure 17** – Installation de stockage par batterie du site de la centrale de West Burton B au Royaume-Uni (EDF renouvelables) d'une puissance de 49 MW.

Le marché du stockage croît à environ 60% par an, les régions clés étant l'Europe, l'Australie et les Etats-Unis :

- **En Europe**, la croissance est principalement portée par des projets de régulation de fréquence, en dépit de l'usage des poches de flexibilité des réseaux censé délayer le besoin de déploiements à grande échelle de batteries (*demand response*, « *vehicule-to-grid* », STEP). Un exemple européen est l'installation de stockage par batterie de West Burton de EDF, mise en service en 2018. Il s'agit du projet le plus important du nouveau système de régulation déployé dans tout le Royaume-Uni avec une capacité de 49 MW. Dans un contexte de fort développement

de la production d'énergies renouvelables et de fermeture des moyens de production vieillissants, la technologie de stockage par batterie permet d'améliorer la stabilité du réseau électrique et de répondre rapidement aux fluctuations de la fréquence de ce réseau.

- **En Australie**, la croissance est portée par le passage du charbon aux énergies renouvelables dans le mix énergétique
- Enfin **aux États-Unis**, la croissance est portée à la fois par la régulation de fréquence, la pénétration des énergies renouvelables et les agendas politiques au niveau des Etats (e.g. Californie).

## D. Multiplicité de services et intelligence associée sur les réseaux

Quatre principaux services peuvent être intégrés à des offres de stockage :

- Régulation de fréquence (capacité de puissance, à court-terme) – service à haute valeur ajoutée qui est la porte d'entrée vers d'autres services intégrés
- Projets sur le marché de gros (réponse à des demandes de puissance à court terme)
- Installations hors-réseau, type autoconsommation (contrats de long terme de capacité de puissance, reposant habituellement sur une source d'énergie renouvelable isolée)
- Contrats PPA de long terme (contrats d'achats énergétiques à long terme, reposant habituellement sur des infrastructures renouvelables intégrées au réseau)

Le stockage d'énergie lié au réseau dépend fortement de l'interopérabilité des services et des réglementations locales.

Un seul système de stockage peut générer plusieurs sources de revenus en effectuant plusieurs services. En revanche, tous les services ne sont pas compatibles les uns avec les autres et la compilation de services n'est pas toujours évidente. Un système peut assurer la continuité de l'alimentation et réaliser un équilibrage du système, ou assurer la continuité de l'alimentation et réaliser une régulation de fréquence, mais il ne peut pas effectuer à la fois l'équilibrage de système et la régulation de fréquence. La possibilité de compiler des services dépend également des contextes réglementaires locaux. Dans la plupart des pays du monde les cadres réglementaires sont en cours d'évolution afin de s'assurer que le stockage puisse participer à la fourniture de tous les services dont les systèmes électriques ont besoin. C'est le cas, par exemple, aux États-Unis et en Europe où les évolutions

<sup>2</sup> Converti au taux spot USD/EUR du 3 Novembre 2020.

en cours amènent des évolutions sur la reconnaissance de l'objet stockage et l'obligation de sa prise en compte dans les réglementations à venir.

## E. La promesse d'un hydrogène décarboné, transportable et stockable pour répondre aux enjeux de la transition énergétique

L'hydrogène comme vecteur énergétique représente un fort enjeu technologique, économique et environnemental dans la transition énergétique mondiale. Au cours de ces dernières années, les progrès technologiques se sont accélérés sur toutes les étapes de la chaîne de la valeur : production de l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables ou faiblement carbonées, logistique de stockage et transport, conversion en énergie électrique.

Les solutions technologiques portées par les champions industriels français et notre potentiel d'innovation sur la pile à combustible PEM, les réservoirs composites de stockage haute pression, l'électrolyse haute température va ainsi permettre de réduire l'empreinte carbone de plusieurs usages, dans l'industrie, la mobilité, et les réseaux gaz.

Les progrès réalisés sur les électrolyseurs, permettent d'envisager des coûts compétitifs d'hydrogène renouvelable ou faiblement carboné avant 2035 et son utilisation à court et moyen terme sur des nouveaux marchés qui vont eux-mêmes soutenir le développement des énergies renouvelables dans une logique de cercle économique et environnemental vertueux.

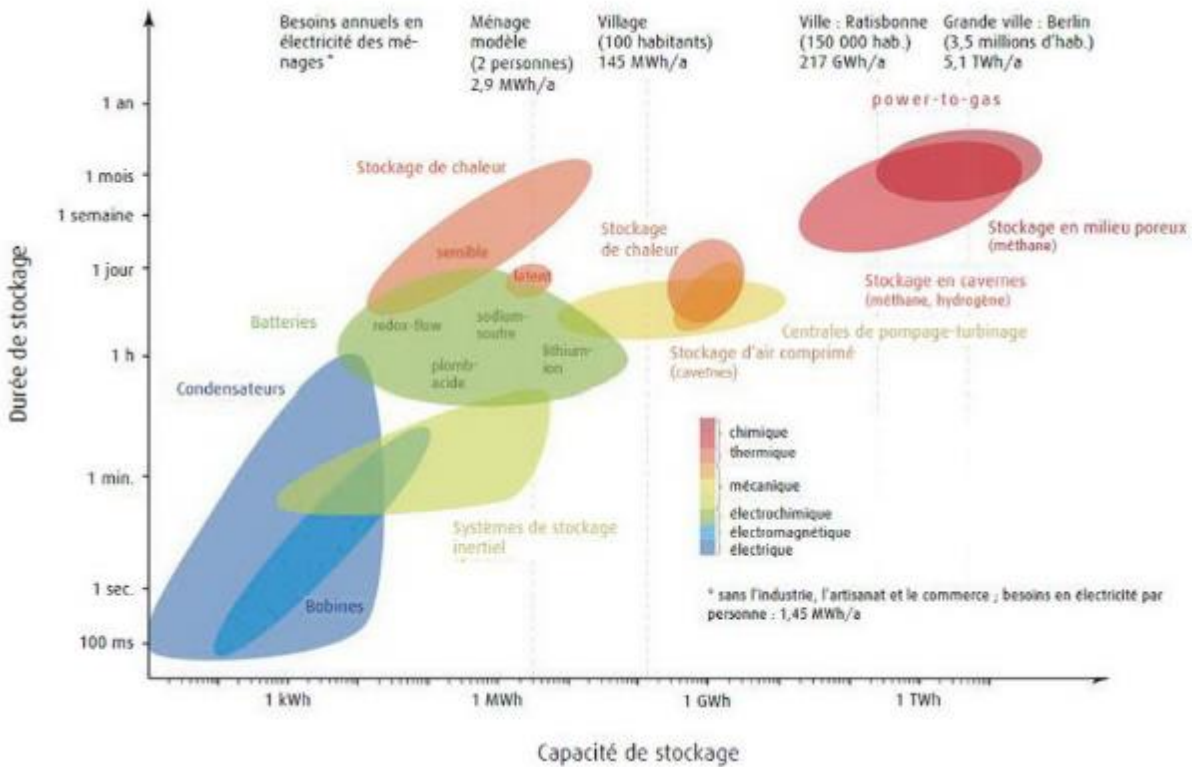
Ces marchés sont :

- **L'hydrogène industriel** (63 MT dans le monde) avec un objectif de production décarbonée en France de 100 000 T en 2023 (10% de la production nationale) et de 400 000 T en 2028 pour un parc d'électrolyseurs installé d'environ 1500 à 2000 MW.
- **La mobilité** en privilégiant les usages dit intensifs, nécessitant des temps de rechargement rapide, des grands rayons d'actions et des transports lourds. L'amorçage de ce marché s'appuie sur un modèle de flotte qui permet de garantir à chaque station de remplissage un volume significatif de véhicule. En France, on prévoit le déploiement de 5000 véhicules légers et 200 poids lourds à horizon 2023 et 10 fois plus à horizon 2028. Les solutions technologiques – de piles à combustible et de réservoirs – proposées par les industriels (Faurecia, Symbio ou Helion par exemple) profitent toutes des développements du CEA.

A terme l'hydrogène vert constituera une capacité naturelle de stockage des excès temporaires de production de renouvelables et assurera ainsi l'équilibre

des réseaux. Le service aux réseaux énergétiques dans un contexte d'infrastructures électriques et gazières en France encore très résilientes au taux de pénétration des énergies renouvelables. L'enjeu est à moyen terme (>2035), mais les opérateurs électriques et gaziers se préparent à utiliser l'hydrogène comme un élément de stabilisation des réseaux énergétiques. Il s'agit dans un premier temps de transformer en hydrogène par électrolyse de l'eau, l'électricité renouvelable produite en excès. Ensuite, l'hydrogène peut être combinée à du dioxyde de carbone pour obtenir du méthane de synthèse par un processus de méthanation (Power to Gas) ou bien reconvertie en électricité à l'aide d'une pile à combustible (Power to Power). Un démonstrateur Power to Gas qui utilise un réacteur de méthanation H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> développé par le CEA est en cours d'expérimentation sur un site industriel de Fos sur Mer (Projet JUPITER 1000). La solution Power to Power est également expérimentée en Corse (projet MYRTE) et en Guyane (projet HYMAZONIE) avec des technologies issues de la recherche française (CEA et CNRS) dans un contexte énergétique particulier de forte pénétration du photovoltaïque.

**EXEMPLE – Différentes technologies de stockage**



**Figure 18** - Classification des différents moyens de stockage de l'électricité en fonction des dimensionnements possibles et des temps moyens de décharge.

**EXEMPLE – Projet Noor Midelt – stockage de l'énergie solaire – Maroc**



**Figure 19** - Ce projet de 800 MW, remporté par le consortium EDF / MASDAR / Green of Africa, constitue une première mondiale qui permettra de disposer d'énergie solaire jusqu'à cinq heures après le coucher du soleil à un prix très compétitif.

© TSK Flagsol

**EXEMPLE – Cas d'un réseau isolé : le développement des îles Féroé**



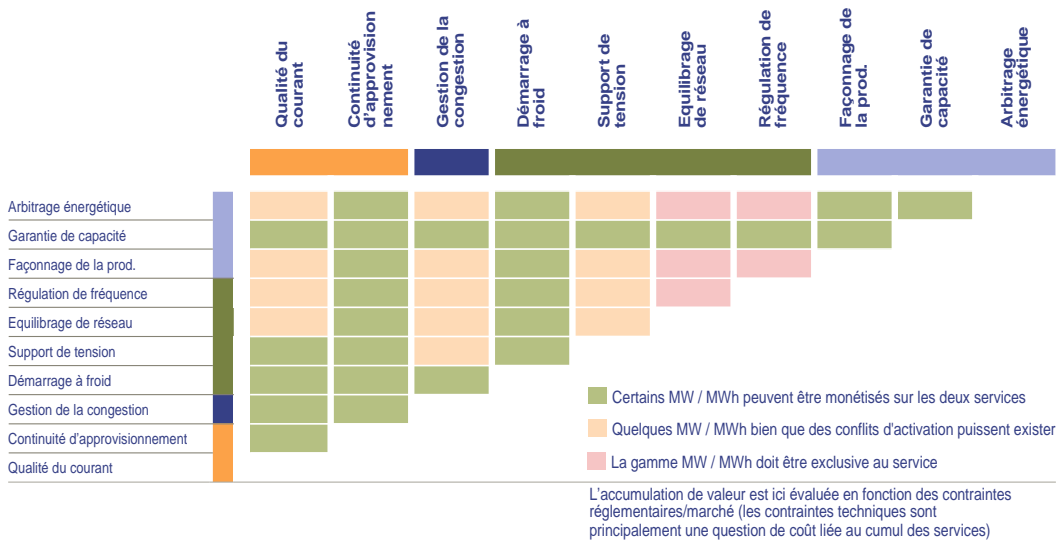
**Figure 20** - SEV, la compagnie d'électricité des îles Féroé, a mis en service le premier système de stockage d'énergie Li-ion (ESS) entièrement commercial en Europe fonctionnant en combinaison avec un parc éolien. La solution de Saft, par conteneurs, contribue à maintenir la stabilité du réseau afin que les insulaires puissent exploiter pleinement le potentiel de leur nouveau parc éolien de 12 MW à Húsahagi.

SEV tire pleinement parti des abondantes ressources éoliennes et hydroélectriques des îles Féroé, ainsi que des technologies émergentes comme le photovoltaïque et l'énergie marémotrice. D'ici 2030, SEV doublera sa demande annuelle actuelle de 314 GWh d'électricité.

La dernière étape du programme d'énergie renouvelable de SEV est un nouveau parc éolien de 12 MW situé à Húsahagi, sur l'île de Streymoy. Depuis sa mise en service en 2014, le parc éolien a augmenté la part de l'énergie éolienne dans la production totale d'électricité des îles à 26 %.

Pour surmonter les variations à court terme liées à la nature variable du vent, qui peuvent durer de quelques secondes à quelques minutes, une batterie Li-ion ESS de 2,3 MW a été déployée. Elle permet de lisser les fortes augmentations et diminutions de puissance, ainsi que des services de réponse en fréquence et de contrôle de tension. L'énergie éolienne excédentaire qui ne peut être injectée dans le réseau, en période de vent fort et de faible consommation, est stockée dans les batteries pour une réinjection ultérieure.

**EXEMPLE – Différentes comptabilités entre les services**



**Figure 21** - L'économie du stockage de l'énergie est basée sur le couplage des services. L'expertise de la réglementation nationale est nécessaire pour comprendre les combinaisons de services et la valeur accessible en faveur du service.

#### A. La valorisation des ressources territoriales

A la différence des énergies fossiles, les ressources énergétiques renouvelables jouissent d'une grande disponibilité et ce, dans l'ensemble des territoires. En revanche, il existe des disparités de répartition de ces énergies sur le territoire. De ce fait, la détermination d'un mix énergétique renouvelable varié et optimal passe par la prise en compte de plusieurs facteurs.

En premier lieu, il convient de tenir compte des disponibilités relatives des énergies renouvelables sur le territoire. Ainsi, contrairement au photovoltaïque disponible partout, l'hydroélectricité et la biomasse sont inégalement réparties entre zones (désertiques, humides mais plates, montagneuses...). Pour le biogaz, si certaines régions du monde présentent des potentiels plus importants, du fait d'une forte activité agricole (génératrice de co-produits et résidus méthanisables), tous les pays bénéficient de ressources en gaz vert basées à minima sur les résidus organiques urbains et domestiques. Qu'il s'agisse d'électricité ou de produits énergétiques faciles à transporter (ex : chips ou pellets de bioénergie, biogaz et biocarburants...), les différences de qualité et d'abondance relative des ressources renouvelables – eu égard au niveau de consommation locale – resteront susceptibles d'engendrer des échanges économiquement justifiés.

L'Allemagne, le Japon et les Pays-Bas ont d'ores et déjà exprimé officiellement leur intention d'importer des produits énergétiques bas-carbone, doutant de disposer de suffisamment de ressources renouvelables « locales » pour soutenir la totalité de leur économie.

Enfin, il est essentiel de structurer les solutions différemment selon les échelles retenues. L'électricité solaire répond à la fois à des enjeux de résilience énergétique locale et d'implication citoyenne par des formes d'autoconsommation, et à des enjeux de modification du mix électrique, par substitution à d'autres énergies (fissiles ou fossiles), avec de grandes installations raccordées au réseau électrique. A contrario, l'éolien *onshore* trouve une plus grande pertinence à grande échelle, permettant de lisser les disparités plus fortes de la ressource d'un point à l'autre d'un territoire donné. Le foisonnement qui en découle nécessite une structuration plus importante du réseau électrique.

Ces deux niveaux d'exploitation des énergies renouvelables ne sont pas antinomiques mais complémentaires. L'exploitation de ces différentes échelles est la seule à même de pouvoir proposer un optimum économique général.

#### B. A intégrer dans un contexte énergétique local existant

Le déploiement des énergies renouvelables doit prendre en compte le contexte énergétique des territoires. Ainsi, dans les zones déjà fortement électrifiées, la transition vers un mix renouvelable implique d'adopter une approche en quatre temps :

1. La localisation des gisements dont l'éolien et le solaire
2. La pré-identification de sites pour le stockage à grande échelle (ex : STEP)
3. La localisation des sites de consommation
4. Le besoin de créer des réseaux ou de reconfigurer la topographie du réseau électrique

L'un des avantages des énergies renouvelables tient à leur capacité de décentralisation, le solaire photovoltaïque disposant d'un potentiel exceptionnel d'adaptation, pouvant s'approcher au plus près des sites de consommation et donc intégrables à toutes sortes de configurations de réseaux préexistants, de nouveaux réseaux locaux créés dans des zones non-interconnectées, voire d'absence totale de réseau en pure autoconsommation. Ainsi, dans une zone déjà électrifiée, il est aisé de déployer des panneaux, en général sans besoin de reconfiguration forte du réseau. Cela peut même aider à le fluidifier et à en améliorer les performances (cf. l'incitation allemande au développement de l'autoconsommation avec stockage pour soulager le réseau et permettre une meilleure répartition des flux sur le réseau entre les sites de consommations et les gisements localisés d'énergie renouvelable, notamment avec l'éolien dans le Nord de l'Allemagne). En parallèle, dans une zone non ou peu électrifiée, un déploiement en « tâche de léopard » permet de profiter rapidement du gisement solaire et d'apporter de premiers services énergétiques indépendants du déploiement d'un réseau complet connecté.

La France dispose de spécificités géographiques avec des zones hyperconnectées et de zones non interconnectées. Les ENR et le stockage offrent d'innombrables combinaisons possibles pour délivrer une électricité verte au consommateur. Les démonstrations françaises sont nombreuses pour illustrer la combinaison : ENR + réseau + stockage + digital + mobilité. La maîtrise de ces savoir-faire est un vecteur d'accélération puissant des transitions énergétiques à conduire.

L'autre vertu de cette capacité d'adaptation et d'intégration à des contextes énergétiques locaux est de pouvoir associer les utilisateurs et les populations d'un territoire à cette transition.

## C. Avec un partage des énergies à différentes échelles

Le territoire est un vecteur fort de la transition énergétique pour des raisons de localisation de la source des énergies renouvelables. Néanmoins, le sujet doit être abordé dans toute sa complexité afin de déterminer les énergies renouvelables les plus pertinentes selon les échelles retenues

Dans de nombreux domaines de consommation tels que l'alimentation, l'énergie, les citoyens tendent à passer d'un modèle linéaire à un modèle de consommation circulaire, avec un souhait accru de rapprocher point de production et point de consommation (ex : circuits courts dans le secteur alimentaire).

Se développent partout dans le monde des bâtiments à énergie positive capables d'auto-consommer, d'autoproduire et de stocker de l'énergie, des réseaux électriques intelligents, interconnectés et flexibles, de nouveaux services aux citoyens, et une industrie du futur dotée de processus de gestion et de moyens de transport décarbonés.

Toutes ces briques technologiques sont aujourd'hui matures pour développer la flexibilité et le partage d'énergie à l'échelle des individus, d'un bâtiment ou encore d'un quartier et piloter finement l'ensemble des flux énergétiques, lorsque cela est pertinent pour le citoyen.

Concernant la méthanisation, différentes typologies de digesteurs existent selon les ressources et les besoins des territoires. Dans les pays à forte activité agricole et possédant un réseau de gaz étendu, le développement de méthaniseurs dit territoriaux, regroupant les résidus organiques de plusieurs exploitations agricoles à l'échelle d'un territoire, avec un point d'injection unique dans le réseau de gaz, s'avèrent pertinent pour générer des économies d'échelle et booster la production (une « alimentation variée » permet aux digesteurs de mieux fonctionner). A l'inverse dans les pays où la production de matières organiques est plus éparpillée et/ou le réseau de gaz n'est pas encore suffisamment étendu (en Afrique, Amérique Latine et Inde par exemple), une valorisation très locale des matières organiques peut être privilégiée, avec un micro-digester par quartier ou par foyer, avec une valorisation directe du biogaz, souvent pour un usage cuisson. Ces micro-méthaniseurs pourraient également se généraliser à terme dans les foyers et établissements collectifs occidentaux, au même titre que les composteurs, pour diminuer les frais de collecte des déchets ménagers et raccourcir au maximum le cycle du carbone.

### A l'échelle des individus

L'accès à l'énergie de 650 millions d'Africains est désormais possible grâce aux énergies renouvelables développées hors réseau en secteur rural. Il permet de couvrir tous les besoins -domestiques, santé, éducation,

sécurité- et permet l'émergence d'activités génératrices de revenus, pierre angulaire du développement.

A titre d'exemple, le partenariat entre Armor et l'UNESCO vise à soutenir l'éducation au Togo en distribuant des kits solaires aux élèves du village d'Akpolo. Grâce au film ASCA®, intégré dans la pochette, la lampe se recharge tout au long de la journée. Elle peut ensuite être utilisée à la nuit tombée pendant plusieurs heures. Les enfants peuvent ainsi étudier le soir lorsqu'ils rentrent chez eux mais aussi apporter une solution d'éclairage à toute leur famille. Des projets similaires vont être déployés au Burkina Faso, Bénin et Togo avec l'association Fondacio qui est impliquée dans des projets liés à la santé et l'éducation.



Figure 22 – Distribution de kit solaires aux élèves du village d'Akpolo.

### A l'échelle d'un bâtiment

Au-delà de l'autoconsommation classique, il existe désormais des solutions de pilotage des usages en association de productions décentralisées et décarbonées. Ces technologies font appel aux algorithmes prédictifs. Il existe ainsi des systèmes qui associent climatisation et photovoltaïque, privilégiant la ressource verte. De même, il est possible d'organiser les besoins de recharges de véhicules électriques, en jumelant photovoltaïque-stockage stationnaire et recharge intelligente des VE. Ces solutions ont été développées par un expert de l'automatisme, la société SIREA, implantée à Castres en France.

Ainsi, à l'échelle du bâtiment, on peut citer l'exemple de Trignac (Loire Atlantique), partenariat d'EDF Renouvelable et de l'enseigne Géo dans la construction d'une ombrière photovoltaïque. Cette dernière, grande de 306 m<sup>2</sup> comprend 185 panneaux solaires (270 W de puissance unitaire). Avec une capacité de 47000 kWh/an, elle permet la production d'énergie destinée à

l'alimentation d'un magasin de 1800 m<sup>2</sup> et d'une station de recharge de véhicules électriques.

Les besoins en énergie du magasin sont couverts à hauteur de 40% par l'installation grâce à un système innovant de stockage par batteries Li-ion (14 modules de 3 kWh).

On retrouve cette association entre autoconsommation photovoltaïque, stockage et recharge de véhicule électrique dans l'ombrière photovoltaïque de Lomme (Hauts-de-France) représentée ci-dessous (Figure 23).



Figure 23 – Ombrière photovoltaïque de Lomme (France).

#### A l'échelle d'un quartier

L'expérimentation LearningGrid by Grenoble (lancée par la CCI de Grenoble et Schneider Electric en juin 2019) est le premier quartier à énergie partagée européen à allier technique et pédagogie.

Ce projet innovant répond à deux objectifs principaux : intégrer les problématiques énergétiques dans les cursus de formation des apprentis et réaliser un *microgrid* pour réduire de 30% les consommations énergétiques du campus de l'Institut des Métiers et des Techniques de Grenoble. L'aspect pédagogique revêt un caractère prépondérant pour l'établissement. L'institut forme, avec Schneider Electric, des spécialistes de la gestion de l'énergie qui ont l'occasion de s'entraîner sur un *microgrid* "grandeur nature". L'établissement intègre aussi les problématiques énergétiques à toutes ses autres formations.

Un peu plus loin de la France, le projet Power-Corner d'Engie en Tanzanie a permis de construire un mini-réseau électrique, composé de panneaux photovoltaïques (d'une puissance de 16 kWc), d'un banc de batteries Li-Ion (de 45 kWh) et d'un groupe électrogène de secours, permettant d'alimenter en électricité le village de Ketumbeine. 161 foyers bénéficient ainsi d'une énergie propre, sans dépendre de lampes à kérosène, de batteries de voiture ou encore de groupes électrogènes. Chacun des 50 clients que compte aujourd'hui PowerCorner paie des frais de connexion via un système mobile (Mobile Money System). Un opérateur engagé dans le village est en charge de la gestion du site PowerCorner. Le client consomme ensuite de l'énergie via un compteur à prépaiement. Les habitants peuvent également se

procurer des appareils électriques avec des conditions de crédit favorables.

On peut également citer l'exemple de la start-up Home Biogaz, partiellement détenue par Engie qui commercialise des micro-méthaniseurs permettant de valoriser localement les résidus organiques d'un quartier, d'une école, d'une université, d'un hôpital... (cf. Figure 26)

## D. Des gisements d'emplois locaux

Cette diversité des modes de production et des modèles de déploiement, qu'ils soient émergents ou matures, permet de créer de véritables filières intégrant des métiers à chaque étape des projets, du développement en passant par la construction, l'installation, l'opération et la maintenance, le démantèlement... Par ailleurs, l'évolution des technologies (ex : développement des tuiles photovoltaïques) contribue à la création de nouveaux métiers.

L'origine des équipements est alors un critère de choix lors de leur sélection, d'une part pour booster les emplois locaux mais aussi pour limiter le bilan carbone de la solution retenue en favorisant sa construction dans un pays au mix électrique décarboné et en diminuant les transports nécessaires à son acheminement.

Un autre exemple d'encouragement de l'emploi local : Les Chantiers de l'Atlantique (ex-STX) fabriqueront la sous-station électrique destinée au projet éolien en mer de Saint-Nazaire développé par EDF et Enbridge, tandis que Cherbourg verra l'implantation prochaine de l'usine de fabrication de l'éolienne la plus puissante au monde. Par ailleurs, General Electric Renewables possède déjà une usine d'éoliennes opérationnelle à Montoir-de-Bretagne (Loire-Atlantique) qui emploie quelques 120 salariés.

On estime qu'un système photovoltaïque complet émet 20 à 80 gCO<sub>2</sub>/kWh en fonction de la technologie utilisée, de l'ensoleillement du site qui joue sur la quantité d'énergie produite, et du pays d'origine des modules (ADEME, ESPACE-PV, 2013). La moyenne française est estimée à 56 gCO<sub>2</sub>/kWh. Si cette valeur est plus élevée que celle d'autres technologies de production d'électricité (comme l'hydraulique, le nucléaire ou l'éolien), elle reste bien meilleure que celles des énergies fossiles.

Ainsi, le temps de retour énergétique des panneaux solaires varie également fortement en fonction de la technologie et de l'origine des panneaux et vaut généralement entre 1.5 ans et 3.5 ans

La multiplicité des modes de production contribue à l'émergence d'un écosystème, profitant à de multiples acteurs et moyens de financement : allant des fonds de pension et institutionnels jusqu'au simple citoyen, en passant par des sociétés d'économie mixte, des sociétés

coopératives citoyennes, des plateformes de financement participatif, et des entreprises impliquées dans les projets.

L'effet collatéral positif est la création d'emplois ancrés dans les territoires.

### **E. Avec une intégration dans le tissu local**

Dans les pays développés, les énergies renouvelables peuvent être adaptées pour s'intégrer directement au tissu local et permettre de développer des ressources en particulier agricoles.

En France, un exemple d'adaptation des énergies au tissu local est l'Agrinergie®. Il s'agit de concilier deux transitions décisives pour les territoires - énergétique et agricole - sur un même espace. Un projet photovoltaïque cohabite ainsi avec un projet en agriculture biologique. La production énergétique devient aussi un levier économique pour financer la transition agricole.

Cette méthodologie permet ainsi de valoriser le foncier agricole sans le détourner de sa fonction primaire qui doit être de contribuer à l'autonomie alimentaire du territoire. Ce concept a abouti par exemple chez Akuo à la création de serres photovoltaïques anticycloniques. La verticalité permettant de concilier sur un même lieu productions agricole et photovoltaïque. Une véritable symbiose s'opère ainsi : la production d'un électron vert tout en préservant le foncier agricole qui peut continuer de remplir sa fonction primaire et vitale.

Les projets agricoles associés aux projets d'énergie sont multiples : cultures de plantes aromatiques, maraîchage

bio à destination des écoles avoisinantes, plantations d'essences endémiques en voie de disparition ou menacées (géranium bourbon, anthurium), apiculture. Ils visent tous la promotion d'une agriculture responsable qui sera génératrice de retombées positives pour les populations riveraines. Ces projets globaux dont la finalité est de satisfaire les principaux besoins fondamentaux des habitants (se nourrir, boire et avoir accès à l'énergie) s'appuient sur les ressources naturellement disponibles, et contribuent ainsi à la l'émergence de territoires durables et autonomes.

Adapter l'énergie au tissu local c'est aussi décider de donner l'opportunité à tous les citoyens de pouvoir investir dans des projets en leur proposant de participer au refinancement de ces derniers par un prêt participatif.

C'est ce que proposent différentes plateformes telle que la plateforme AkuoCoop, qui se caractérise par la robustesse des projets proposés en financement et un montant moyen de prêt par prêteur très élevé. Bien plus qu'un outil de financement, ces plateformes représentent un outil de partage qui permet aux développeurs d'accroître encore la collaboration avec les acteurs du territoire qui sont ceux qui leur permettent de donner vie à leurs projets.

Il est aussi possible de recourir aux énergies renouvelables pour reconvertir et valoriser des sites pollués et/ou délaissés (Figures 24 et 25).

## EXEMPLE – Différentes possibilités de reconversion



**Figure 24** - Réalisation de la Générale du Solaire – reconversion d'un terrain utilisé comme décharge pour matériaux de construction, fortement pollué par des métaux lourds, en centrale solaire.



**Figure 25** - Réalisation d'ENGIE – Centrale photovoltaïque de Drambon : Mise en service sur un centre de stockage des déchets, la centrale photovoltaïque de 12 MW produira l'équivalent de la consommation électrique annuelle d'environ 6 800 habitants.

## EXEMPLE – Les micro-méthaniseurs pour valoriser les résidus organiques



**Figure 26** - Micro-méthaniseur commercialisé par la start-up Home Biogaz (partiellement détenue par ENGIE)

Plus de 10 000 micro-méthaniseurs ont été vendus depuis le lancement de l'entreprise, d'abord en Californie puis en Afrique, en Amérique latine et en Inde où le biogaz est souvent utilisé en alternative aux bûches de bois, participant ainsi à la limitation de la déforestation illégale.

Des projets pilotes sont en cours en France (région nouvelle Aquitaine) et aux Etats-Unis (Ohio State University) pour installer des digesteurs plus grands (jusqu'à une tonne par jour) afin de valoriser localement les résidus organiques.

## EXEMPLE – La centrale Biométhane des Hautes Falaises pour valoriser les déchets verts



**Figure 27** - Réalisation d'ENGIE Bioz (filiale du groupe ENGIE) - Centrale Biométhane de Hautes Falaises (Normandie, France)

La Centrale Biométhane des Hautes Falaises répond aux enjeux de la transition énergétique et de l'économie circulaire, en transformant des matières organiques d'une part en gaz renouvelable, d'autre part en amendements pour les sols et fertilisants pour les cultures. Ce projet a été conçu et réalisé par ENGIE Bioz en partenariat avec 39 exploitations, en synergie avec les acteurs économiques de la région Normandie et du territoire de Fécamp. Ce projet s'appuie en particulier sur la filière équine, qui fait la renommée de la Normandie.

Les objectifs de production annuelle de cette centrale s'élèvent à 1,7 millions de m<sup>3</sup> de biométhane réalisés à partir de 16 860 tonnes de substrats. Cette production représente 11 % de la consommation de la poche de distribution de Fécamp pour les particuliers, les industriels et les équipements publics ; ce qui équivaut à la consommation annuelle de 1 400 foyers chauffés au gaz.

La déflagration mondiale causée par la Covid-19 révèle une vulnérabilité systémique dont personne n'avait anticipé l'ampleur. Ce simple virus de quelques nanomètres, en interrompant la marche du monde, a mis en exergue la fragilité des systèmes économiques actuels et conduit à l'urgence de repenser la résilience collective, évidemment européenne, pour se préparer aux crises futures, notamment climatiques.

## 1 - La pandémie de la Covid-19 : une opportunité à saisir et à conforter pour les ENR

Les ENR permettent d'accroître notre résilience. Outre leur faible impact sur le climat, les énergies renouvelables sont dites « réparties », parce qu'elles permettent de rapprocher au plus près la production d'énergie des lieux de consommation, dans une sorte de circuit court de l'électricité mais aussi circuit court pour la production de chaleur et de froid.

La très grande majorité des installations productrices d'ENR sont insensibles aux chocs sur les prix de l'électricité grâce à des mécanismes de contrats de long terme avec prix fixe. Du côté de l'offre, cette capacité à contractualiser un prix fixe sur des durées longues est un atout des ENR, qui provient de leur structure de coûts opérationnels très prévisibles et en particulier non tributaire des aléas de prix de combustibles. Cependant, en France, du côté de la demande d'électricité et pour les arrangements contractuels privés – hors appels d'offre de la CRE –, la crise récente, avec la chute des prix de marché observée au second trimestre 2020 (le prix moyen de marché ayant chuté en avril 2020 à 13,45€/MWh en France), tend à pousser les gros consommateurs à demander l'introduction de clause de flexibilité des prix, y compris dans les contrats à long terme. Et, dans l'immédiat, la baisse des prix de l'électricité observée sur le marché à la suite de l'état d'urgence sanitaire mis en place en mars 2020 a mécaniquement renchéri le coût pour les finances publiques du soutien aux ENR cette même année par rapport aux estimations initiales. Ainsi, le risque existe aujourd'hui qu'une pression « budgétaire » s'exerce en faveur de la réduction du volume des futurs appels d'offre pour le renouvelable.

Par ailleurs, la compétitivité des renouvelables reste fragile quand elles font système : leur développement mondial tend naturellement à réduire la demande adressée aux énergies fossiles, et donc leur prix. Une supériorité économique totale est peut-être un mirage, dont l'horizon s'éloigne quand on s'en approche... C'est « tout bénéfice » pour les consommateurs et pour l'économie, notamment celle des pays en développement qui ne disposent pas de ressources fossiles, c'est nettement moins favorable à la maîtrise des changements climatiques et à la poursuite de la progression des

renouvelables. Un cadre de politiques favorables restera donc nécessaire, et sans doute pour longtemps.

Ainsi, pour que les ENR changent d'échelle et que la France s'inscrive effectivement dans les scénarii de l'accord de Paris, il est essentiel que les Pouvoirs Publics maintiennent les mécanismes en vigueur (fixation des prix sur 20 ans) et poursuivent l'augmentation des volumes offerts aux appels d'offres tant pour le solaire photovoltaïque que pour l'éolien. Les projets énergétiques renouvelables sont en effet à forte intensité capitalistique par rapport au coût final de l'énergie produite (le « combustible » étant gratuit), si bien que le volume des projets réalisables dépend très fortement du coût du capital. De ce point de vue, le contexte de taux d'intérêt durablement bas, qui est extrêmement favorable à la transition énergétique, sera d'autant plus efficace que ces projets pourront être financés avec un fort levier d'endettement. Pour canaliser une part sensiblement plus élevée de l'épargne des institutions comme des ménages vers le financement du renouvelable, de nombreuses entreprises financières françaises, comme Amundi, ont développé tout récemment des produits financiers entièrement dédiés aux ENR. Mais, pour qu'en parallèle le nombre de projets finançables s'accroisse fortement grâce à la maximisation de l'effet de levier (part de la dette dans l'investissement total), il est nécessaire de réduire l'incertitude quant à l'évolution à moyen et long terme des prix de vente de l'électricité produite par ces installations. Si, à rebours, on en venait à réduire le volume des futurs appels d'offre, la simple augmentation de l'incertitude sur les prix de vente qui en résulterait conduirait les banques à réduire considérablement l'effet de levier et donc à réduire fortement le nombre de nouveaux projets « bancables », même si le coût de production de l'électricité renouvelable est d'ores et déjà aujourd'hui compétitif.

## Vers zéro émissions nettes en 2050

Le mouvement vers zéro émissions nettes de gaz à effet de serre en 2050 prend de l'ampleur. A fin octobre 2020, cet objectif – aujourd'hui atteint au Suriname et au Bhoutan - avait valeur légale au Danemark, en France, Hongrie, en Nouvelle Zélande, au Royaume Uni et en Suède – et figurait à l'ordre du jour des législateurs de l'Union Européenne, du Chili et des îles Fidji. On le trouvait également dans des documents politiques au Costa Rica, au Japon, en Norvège, en Suisse, aux îles Marshall, en République Sud-Africaine.

Même si la Chine a choisi, elle, 2060, pour atteindre le même objectif, le mouvement semble irrésistible. Il a sans doute inspiré à l'Agence Internationale de l'Energie son tout nouveau scénario, le *Net Zero emissions by 2050 (NZE2050)* au niveau mondial, morceau de choix du *World Energy Outlook* au côté des plus traditionnels *Stated Policy Scenario* et *Sustainable Development Scenario* – ce dernier compatible avec zéro émissions nettes en 2070 seulement.

Le point de départ de ce scénario, c'est la réduction des émissions dès 2030 à un niveau de 20 Gt plutôt que 26.7 Gt dans le SDS. L'AIE considère que c'est impossible sans des changements comportementaux – encore un langage nouveau pour elle. Il s'agit vraiment d'efforts volontaires de réduction de la demande, au-delà même des progrès de l'efficacité énergétique et de « l'efficacité matérielle » - l'augmentation de la réutilisation et du recyclage.

Reste une part essentielle pour les changements technologiques, une grosse moitié dans la production d'électricité, le reste au niveau des secteurs utilisateurs.

En particulier, l'électrification plus rapide des bâtiments, de l'industrie et des transports fait coup double, réduisant la demande finale d'énergie car véhicules électriques et pompes à chaleur sont quatre à cinq fois plus efficaces que les moteurs à combustion interne et les chauffages fossiles. La part de l'électricité dans l'énergie finale bondit ainsi de 19% en 2019 à 28% dès 2030.

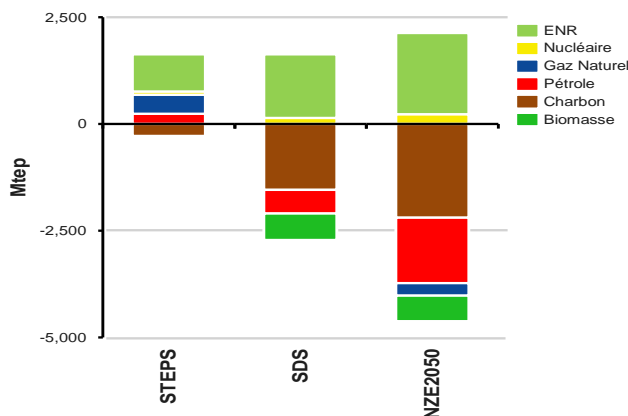


Figure 28 – Prévisions d'évolution de la demande en énergie de 2019 à 2030.

Ainsi qu'on peut le voir sur la figure ci-dessus, au-delà de la baisse de la consommation d'énergie c'est essentiellement la croissance des renouvelables qui permet de réduire significativement la consommation des fossiles. C'est surtout vrai de l'éolien et du photovoltaïque, dont la croissance doit fortement accélérer afin d'atteindre en 2030 un rythme d'installations annuelles de 280 GW pour l'éolien et de près de 500 GW pour le PV – et pour ce dernier une capacité mondiale en 2030 quadruple de celle d'aujourd'hui (graphe ci-dessous).

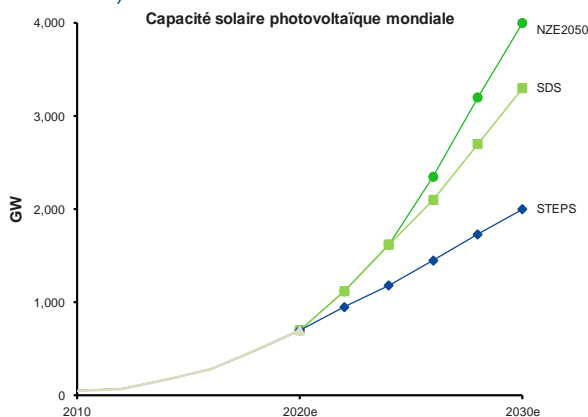


Figure 29 – Prévisions d'évolution de la capacité solaire mondiale.

## 2 - Les énergies renouvelables participent de la relance de l'économie européenne

« Les gouvernements ont une opportunité telle qu'on n'en rencontre qu'une fois dans la vie de relancer leurs économies et l'emploi tout en accélérant le passage vers un futur énergétique plus résilient et plus propre », déclare Fatih Birol, directeur de l'AIE dans le rapport<sup>3</sup> présenté en juin 2020.

Les énergies renouvelables sont susceptibles de faire l'objet de relocalisation de filières industrielles permettant d'avoir à l'intérieur des frontières les équipements nécessaires à la transition énergétique, tout en créant des emplois et de la valeur ajoutée conduisant à ce que de premiers projets, ambitieux mais réalistes, voient le jour :

- Airbus du photovoltaïque conçu par l'Institut Photovoltaïque d'Ile-de-France (IPVF) et le Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) afin de produire en masse les wafers, cellules et modules nécessaires à l'échelle de l'Union européenne<sup>4</sup> ; le projet d'une usine de production en France (2 GWc puis 4 GWc) à Sarreguemines portée par le Norvégien REC avec la technologie de l'hétérojonction (rendement certifié de 23,9%) mise au point par le CEA-Liten qui a réussi un premier transfert de technologie en 2018 avec l'Italien Enel dans son usine de Catane en Sicile (200 MW).
- Airbus des batteries porté un consortium de 17 entreprises et subventionné par sept Etats<sup>5</sup> à hauteur de 3,2 milliards d'euros – avec l'accord de Bruxelles qui l'a estampillé Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC) –, qui s'ajoutent aux cinq milliards d'euros apportés par les industriels du consortium. En France, une usine pilote à Nersac, en Nouvelle-Aquitaine, avec 200 emplois à la clé. Deux autres sites, un en Allemagne et un autre en France, devraient ensuite voir le jour lors du passage à la phase de production à partir de 2022. Au global, cela représente un potentiel de 2 à 3 millions d'emplois en Europe. Très récemment, un consortium d'acteurs industriels mené par EIT InnoEnergy, a annoncé le lancement d'un projet de *gigafactory* reposant sur une technologie Li-Ion maîtrisée, avec pour ambition de répondre à la demande future de l'industrie automobile.

Un déploiement industriel qui peut s'appuyer sur un tissu de PME dynamiques – « En 2028, si les objectifs de développement des énergies renouvelables fixés dans la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) sont atteints, ce secteur représentera 264 000 emplois directs et indirects en France »<sup>6</sup>, et un terreau scientifique et technique de premier ordre. On estime qu'il y a environ 500 chercheurs (équivalents temps pleins) dans le secteur public (CNRS, universités, écoles, CEA...), auxquels il faut ajouter la recherche menée par les industriels comme EDF, Total et les recherches "annexes", telle que le

numérique et la micro-électronique. Le nombre de publications et de brevets européens (8301 brevets déposés par l'Allemagne, le Danemark, la France, l'Italie, le Royaume-Uni et l'Espagne entre 2010 et 2019<sup>7</sup>) dans le domaine des énergies renouvelables<sup>8</sup> confère une avance certaine à l'Europe dans la compétition mondiale. Parmi ces innovations, on peut citer la technologie *monolike* qui permet de conjuguer les qualités du silicium monocristallin et multicristallin, les technologies tandem de haut rendement, des cellules en couches minces à base de perovskite, les cellules organiques pour les modules souples, les modules bi-faciaux...

La couverture du Pavillon français sera ainsi assurée par les tuiles photovoltaïques de Sunstyle® produites en France, à Châtellerauld. L'ambition de Sunstyle® est de localiser en France une *gigafactory* de tuiles photovoltaïques pour irriguer le marché international.

La crise pourrait donc avoir comme conséquences collatérales à la fois de catalyser la prise de conscience de notre vulnérabilité stratégique, de révéler la solidité du modèle des énergies renouvelables, d'illustrer leur contribution à la résilience des sociétés, de créer les conditions politiques et économiques d'une relocalisation industrielle, et plus largement d'accélérer des transitions qui étaient pour la plupart déjà entamées avant l'irruption de la Covid 19. C'est par la conjonction simultanée de ces différents facteurs que cette crise peut constituer une opportunité historique pour le développement des ENR.

## 3 – Un nouveau souffle pour l'Europe : l'Union de l'énergie attisée par les ENR

Le savoir-faire industriel, les connaissances scientifiques et les technologies de pointes sont répartis en Europe mais se conjuguent pour donner vie à l'Union de l'énergie que promeut l'exécutif comme le parlement européen.

L'Union de l'énergie est plus que jamais d'actualité. Ce serait le retour aux sources pour l'Union européenne dont les fondements furent la Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA), en 1951, et le Traité Euratom, en 1957 : « S'il est aujourd'hui un projet qui est porteur d'une vision positive de la construction européenne, c'est bien celui de la transition énergétique »<sup>9</sup> Jacques Delors & Enrico Letta.

Cette Union de l'énergie existe déjà dans les faits avec le Paquet Climat Énergie 2030 qui voit passer la part des renouvelables de 27 % à 32 % dans le mix énergétique en dix ans et l'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. « L'urgence climatique » a été décrétée par le Parlement européen dans un vote à une large majorité. Même si certains verrous demeurent : l'énergie est une compétence partagée de l'Europe avec les États membres, et non exclusive, et se trouve donc entravée par les principes de subsidiarité et de proportionnalité, sans compter que toute décision qui aurait un impact fiscal nécessite en outre un vote à l'unanimité des États.

<sup>3</sup> Sustainable Recovery, World Energy Outlook Special Report, juin 2020.

<sup>4</sup> IPVF, Solar Europe Now – Call to Action for a solar-inclusive Green Deal.

<sup>5</sup> Allemagne, Belgique, Finlande, France, Italie, Pologne et Suède.

<sup>6</sup> Etude de EY pour le syndicat des énergies renouvelables, juin 2020.

<sup>7</sup> Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (OMPI).

<sup>8</sup> Énergie solaire, éolienne, géothermique et les piles à combustible.

<sup>9</sup> « Faire de la transition énergétique une réussite européenne », Notre Europe, 2017.

L'adoption en décembre 2019 du Green Deal par le Conseil européen est un signal fort. Il est au cœur du Plan de relance européen adopté par le Conseil européen de juillet 2020 qui prévoit 15 GW de projets pour un investissement de 25 Mds€, en plus du fonds d'investissement pour le bâtiment (isolation, installation de panneaux solaires, solutions de chauffage/climatisation renouvelables), et les mesures pour la mobilité propre.

La crise est l'occasion pour l'Europe d'une prise de conscience de son potentiel, mais aussi de la nécessité

de mieux tirer parti de son écosystème et de ses atouts. C'est nécessaire pour atteindre les objectifs qu'elle s'est fixée. Mais l'enjeu est aussi de se hisser à la hauteur de ses responsabilités : disposer de la richesse de ce savoir-faire scientifique et industriel confère le devoir de l'exploiter au mieux pour apporter une contribution décisive aux défis contemporains du changement climatique, de l'épuisement des ressources et de l'accès à une énergie durable pour tous

## CONCLUSION

La pandémie de la Covid-19 a montré l'urgence d'écrire un scénario permettant d'être plus résistant et résilient face aux futures crises, notamment climatiques. « *Le propre de la crise c'est que, quand elle est passée, tout redevient comme avant. A l'inverse, « catastrophe » (du verbe grec strepho, qui signifie « tourner » et a donné katastrophê, « renversement ») désigne un bouleversement tel qu' « après » ne sera plus jamais comme « avant », explique le neuropsychiatre Boris Cyrulnik. La résilience dépendra de deux facteurs. L'un est le soutien mutuel des uns envers les autres, la solidarité de tous. L'autre sera notre capacité, ou non, à inventer* »<sup>10</sup>. L'ampleur de ces défis est telle que les réponses apportées doivent s'élaborer nécessairement à l'échelle de grands ensembles politiques et économiques

comme l'Europe. Et ce, alors même que la principale force des ENR est pourtant leur caractère local, décentralisé, diffus, et donc leur capacité à irriguer jusqu'aux territoires les plus isolés. Tel est le paradoxe mais tel est aussi l'immense promesse des ENR.

« Nous ne pouvons pas changer nos futurs, mais nous pouvons changer nos habitudes qui changeront nos futurs ». Ces mots ont plus de 7 siècles mais ils sont d'actualité. Ce sont ceux attribués à Marco Polo.

Il y a là, une chance unique voire historique d'apprendre de cette crise sanitaire dramatique : il faut changer les habitudes de tous pour changer le futur !

<sup>10</sup> Interview de Boris Cyrulnik, Covid-19 - « Revenir au 'business as usual', ce sera provoquer d'autres catastrophes », 29 avril 2020.

Ce rapport a été réalisé par le groupe de travail « **Les énergies renouvelables 2.0 dans les territoires de demain** » du *Think Tank* Connecter les Esprits, qui accompagne la participation de la France à l'Exposition universelle de Dubaï en 2020. Ce groupe de travail est présidé par Olivier Paquier, de l'entreprise Amundi, assisté par les membres du cabinet de conseil KEARNEY qui se sont succédés dans cette mission (Louise Boutinet, Marie Bracco, Laura Breban, Ambre Laute, Maxence Racault, Gaspard Randon de Grolier, Badr Rhomari et Lisa Saadi).

Nous remercions chaleureusement les membres de notre groupe de travail pour leur contribution active à l'écriture de ce rapport :

- **Gwenaëlle Avice-Huet** – Engie SA
- **Marie Bayard-Lenoir** – BW Ideol
- **Daniel Bour** – Générale du Solaire
- **Denis Bourene** – Armor
- **Jean-Marc Boursier** – Suez
- **Marianne Chami** – CEA
- **Rosaline Corinthien** – Engie France Renouvelables
- **Mathilde Costes-Majorel** – CEA
- **Antoine de Chillaz** – EDF Renouvelables
- **Paul de la Guérivière** – BW Ideol
- **Vianney de Lavernée** – Engie France Renouvelables
- **Tiana Delhome** – CEA
- **Vincent Delporte** – Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
- **Ignace de Prest** – Sunna design
- **Alban d'Hautefeuille** – Total
- **Noemie Flammarion** – Suez
- **Bruno Fyot** – EDF Renouvelables
- **Carlotta Gentile Latino** – EDF Renouvelables
- **Sozic Hemion** – Engie France Renouvelables
- **Antoine Huard** – Générale du Solaire
- **Vincent Jacques Le Seigneur** – Observ'ER
- **Mathieu Jamot** – KEARNEY
- **Aurélie Jardin** – Schneider-Electric
- **Florence Lambert** – CEA
- **Charlotte Lampre** – Suez
- **Safia Limousin** – KEARNEY
- **Benoit Lombardet** – Total
- **Nicolas Maccioni** – AKUO Energy
- **Nicolas Ott** – BCM Energy
- **Olivier Paquier** – Amundi
- **Cédric Philibert** – Sciences-Po et Institut Français des Relations Internationales (IFRI)
- **Julien Pouget** – Total
- **Eric Scotto** – AKUO Energy
- **Tristan Zipfel** – EDF Renouvelables



