

B Explication des technologies bas carbone

Dans cette annexe, une légère explication sur les différentes technologies bas carbone existantes va être réalisée.

Le nucléaire est l'une des technologies bas carbone les plus matures présentes sur le marché électrique avec l'hydroélectricité. Le nucléaire a commencé à être utilisé pour répondre aux crises pétrolières des années 1970. Les centrales nucléaires permettent de convertir l'énergie nucléaire en électrique, sans émission de *GES*, grâce à la fission de composés radioactifs comme l'Uranium 235 (Dewallef, 2020). Cependant, vu les risques liés à une potentielle catastrophe comme celles de Tchernobyl ou Fukushima ainsi que le traitement et le stockage des déchets nucléaires, les pays développés utilisant le nucléaire se retirent⁷⁹ petit à petit de cette source d'énergie (Europe écologie les verts, nd). Ce retrait est visible sur la Fig. 1. Cependant, un regain dans son utilisation est attendu dans les pays en développement comme la Chine et l'Inde, car ils commencent à avoir accès à cette technologie (BP, 2022). Ils vont l'utiliser afin de décarbonner en partie le développement de leurs économies.

Les sources d'énergie renouvelables (SERs) sont des sources d'énergies considérées comme inépuisables, grâce à leurs renouvellements naturels, étant soit directement (thermique, solaire photovoltaïque) ou indirectement (éolien, hydroélectrique, biomasse) obtenues à partir du soleil (Dewallef, 2019). Il existe d'autres sources indépendantes du soleil comme la géothermie ou les marées (Krishan and Suhag, 2019). Ces sources d'énergies sont converties en une forme énergétique utilisable telle que majoritairement de l'électricité, mais aussi des carburants et de la chaleur. De manière générale, les SERs sont classées en 2 grandes catégories : les stables et les intermittentes. L'hydroélectricité est la forme stable la plus utilisée et mature. En effet, cette forme a été la première SERs utilisée par l'homme vu sa stabilité, son faible coût et sa grande disponibilité dans certaines régions du monde (Ernst, 2019b). Néanmoins, actuellement, sa proportion dans le mix énergétique mondial reste constante (Fig. 1), car les meilleurs sites sont déjà exploités. Les nouvelles installations se font principalement actuellement en Asie (BP, 2021b). Cependant, les SERs intermittentes, notamment le solaire et l'éolien, et leurs proportions dans le mix énergétique sont en plein développement. Cela est observable sur la Fig. 1. La croissance annuelle mondiale dans l'utilisation de ces sources est de 13.4% sur les dix dernières années (BP, 2021b). Vu qu'elles n'émettent pas de GES, les principaux consommateurs d'énergie se sont fixés des objectifs concernant leurs productions d'électricité basées sur celles-ci. Par exemple, les États-Unis et l'Allemagne se sont fixés comme objectif respectif de produire

⁷⁹Il existe cependant certaines exceptions comme la France qui va réinvestir massivement dans le nucléaire afin de renouveler ses installations.

30% et 45% de leur électricité à partir de ces sources (Krishan and Suhag, 2019). Dans ce but, l'UE avait imposé à ses états membres que 20% de la consommation énergétique provienne de sources renouvelables pour 2020 (European Commission, 2021a). Pour cela, en 2020, près de 479 [GW] de capacité de production renouvelable dont 162 [GW] et 136 [GW], respectivement sous forme d'éolienne terrestre et solaire photovoltaïque, étaient en fonctionnement (IRENA, 2022a). Cela représentait près de 22.1% de l'énergie finale consommée en UE en 2020, dépassant ainsi l'objectif fixé de 20% (Occitanie Europe, 2022). Au niveau mondial, en 2020, 2800 [GW] de capacité de production énergétique renouvelable étaient en fonctionnement. Parmi celles-ci, 697 [GW] et 710 [GW] étaient respectivement des capacités de production électrique sous forme d'éolienne terrestre et solaire photovoltaïque (IRENA, 2022a). Ces deux types de capacités ont produit, en 2020, 3.2% de la consommation énergétique mondiale (BP, 2022).

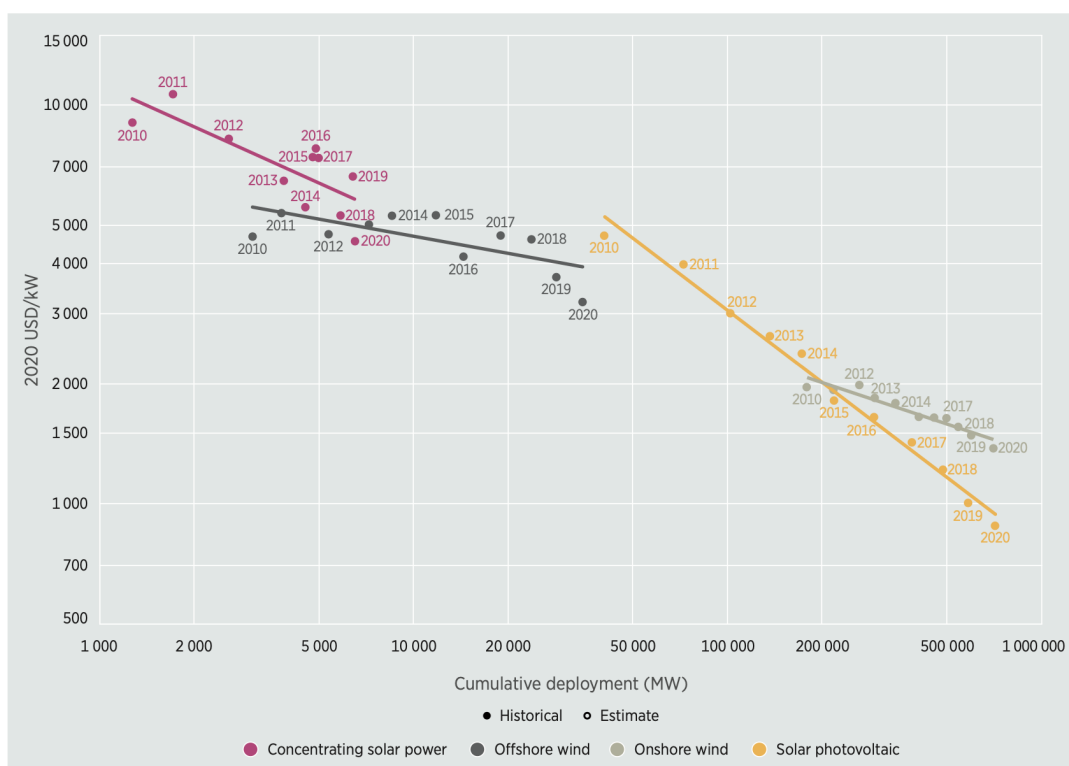


Fig. 17: Évolution du coût des technologies utilisant des sources d'énergie renouvelables intermittentes (éolienne terrestre et maritime ainsi que le solaire photovoltaïque et CSP) de 2010-2020 en fonction de la puissance cumulée installée (IRENA, 2021).

Afin de respecter ces ambitions, des technologies utilisant les SERs, ont été développées et installées, même si leur coût était initialement supérieur à celui des combustibles fossiles. Cependant, vu leurs développements au cours du temps et de l'effet d'expérience, leur prix [\$/kW] a diminué en fonction de la puissance cumulée installée (IRENA, 2021). La Fig. 17 illustre l'impact de l'effet d'expérience sur le coût des technologies utilisant des

SERs intermittentes (éolienne terrestre et maritime ainsi que le solaire photovoltaïque) comme moyens de production électrique.

À partir de la Fig. 17, les pentes d'apprentissages⁸⁰ des différentes technologies peuvent être déduites. De 2010 à 2020, celles du solaire photovoltaïque et de l'éolien terrestre ont été de respectivement 34% et 16.6% (IRENA, 2021)⁸¹. Avec l'amélioration des technologies, les facteurs de capacité⁸² ont augmenté⁸³. Vu cette diminution des coûts et ces améliorations, le coût moyen de production de l'électricité (*LCOE*) a diminué de 56%⁸⁴ et 85%⁸⁵ sur dix ans pour, respectivement, l'éolien terrestre et le solaire photovoltaïque. De plus, les pentes d'apprentissages du coût moyen de l'électricité peuvent être déterminées en tenant compte de la puissance cumulée installée. Dès lors, de 2010 à 2020, les pentes d'apprentissages du coût moyen de l'électricité produite à partir du solaire photovoltaïque et de l'éolien terrestre ont été de respectivement 39% et 32% (IRENA, 2021). La connaissance des pentes d'apprentissage pourra être utile lorsqu'il faudra déduire les *LCOE*, des différentes SERs intermittentes utilisées pour produire de l'hydrogène "vert", des capacités futures installées.

Actuellement, les moyens de production électrique tels que l'éolien terrestre et solaire photovoltaïque sont concurrentiels et même moins chers que ceux à partir des combustibles fossiles (IRENA, 2021). De plus, vu la tendance vers l'installation de nouvelles capacités de ces deux types, il est attendu que le coût de ces deux moyens de production électrique continuent à diminuer (Krishan and Suhag, 2019). La tendance opposée est attendue pour l'électricité produite à partir de combustibles fossiles vu la diminution de leurs réserves ainsi que l'évolution du prix des quotas. Mais, avec la pénétration de plus en plus importante des SER dans le mix électrique, des coûts supplémentaires devront être nécessaires, afin d'augmenter la flexibilité du réseau électrique avec par exemple des unités de stockage, ralentissant la diminution de coût (BP, 2022).

Cependant, l'utilisation des SERs intermittentes mène à quelques défis. Premièrement, celles-ci existent sur de larges zones géographiques, par rapport aux sources d'énergie fossiles, mais avec une faible densité énergétique. Dès lors, les installations nécessitent une large superficie et donc ne peuvent pas être localisées à proximité des zones de haute

⁸⁰Pourcentage moyen de réduction des coûts enregistrés pour chaque doublement de la capacité installée cumulée.

⁸¹Par conséquent, vu la pente d'apprentissage plus importante pour le solaire photovoltaïque que l'éolien terrestre, son coût est passé en dessous de celui de l'éolien terrestre.

⁸²Pourcentage de temps où la technologie peut fonctionner à puissance nominale.

⁸³De 14% à 16% pour le solaire photovoltaïque et de 27% à 36% pour l'éolien terrestre (IRENA, 2021).

⁸⁴De 89 [\$/MWh_{elec}] à 39 [\$/MWh_{elec}] (IRENA, 2021).

⁸⁵De 381 [\$/MWh_{elec}] à 57 [\$/MWh_{elec}] (IRENA, 2021).

consommation. Mais, le principal défi reste leur nature intermittente. Contrairement aux combustibles conventionnels, ces sources d'énergie ne permettent pas de fournir une réponse immédiate de production lors des variations de la demande vu leur dépendance aux conditions météorologiques. De plus, le principal vecteur énergétique produit par les SERs est l'électricité, représentant actuellement un peu plus de 20% de la consommation énergétique mondiale (IRENA, 2022b). Les domaines industriels, du transport et de l'agriculture utilisent très peu l'électricité et une transition vers une électrification directe de ces secteurs sera difficile. Dès lors, d'autres **technologies bas carbone en phase de développement**, comme la capture et le stockage géologique du carbone, l'hydrogène, les carburants biologiques, le stockage électro-chimique, ... seront utilisées pour être complémentaires par rapport aux inconvénients des SERs.

Il existe une multitude de technologies permettant **la capture et le stockage du carbone**⁸⁶ (CSC). Mais celles-ci possèdent quelques inconvénients comme (Léonard, 2019) :

- la réduction du rendement électrique sur les installations;
- le coût élevé. En effet, le coût actuel pour capturer et stocker est entre 80 et 100 [€/tCO₂e]. Cependant, avec l'augmentation du prix, cette technologie peut devenir rentable au sein de l'*UE*;
- sa spécificité aux grosses unités de production énergétique et à la capture du dioxyde de carbone;
- il faut s'assurer qu'aucune fuite n'apparaîtra avec le temps dans l'unité de stockage.

⁸⁶Cette technologie est une mesure secondaire, c'est-à-dire qu'elle ne permet pas de réduire les émissions lors de la combustion, mais de les réduire avant leur relâchement dans l'atmosphère (Global CCS Institute, 2021).