

LES ENERGIES RENOUVELABLES ET DE RECUPERATION

Décembre 2017⁽ⁱ⁾

Ce qu'il faut retenir

Associées à une politique de maîtrise de nos consommations d'énergie, les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) sont en capacité de couvrir plus des deux tiers des besoins de la France en 2050, assurant ainsi la sécurité d'approvisionnement et la stabilité des coûts, un taux élevé d'indépendance énergétique, la préservation de l'environnement et une relocalisation de la valeur et des emplois.

Cette Fiche technique est complémentaire de l'Avis de l'ADEME sur les énergies renouvelables et de récupération – Décembre 2017)

TABLE DES MATIERES

1. De quoi parle-t-on : les EnR, une diversité d'énergie et de technologies	2
1.1 Exemples pour les entreprises	2
1.2 Exemples pour les collectivités territoriales :	3
1.3 Exemples pour le grand public :	4
2. Etat des lieux, gisements, et dispositifs de soutien	6
2.1 Etat des lieux dans le Monde	6
2.2 Etat des lieux en France	6
2.3 Des gisements nationaux très importants	10
2.4 Les dispositifs de soutien en France et leur évolution.....	12
3. Forces et atouts des énergies renouvelables	14
3.1 Une compétitivité croissante des EnR	14
3.2 Des filières industrielles et des retombées économiques en croissance	16
3.3 Des technologies EnR ayant globalement de faibles impacts environnementaux.....	18
3.4 Des filières de production au service d'une réappropriation locale de l'énergie	20
4. Points d'attention / opportunités d'amélioration	21
4.1 Des filières nécessitant encore un soutien public ciblé	21
4.2 La perception sociale.....	22
4.3 Un enjeu de formation et de montée en compétence des acteurs.....	22
4.4 L'intégration locale aux réseaux	23
4.5 Les leviers pour optimiser l'usage des sols	24
5. Un fort potentiel de synergie entre les réseaux et systèmes énergétiques	25
6. Annexes	26
6.1.1. Etat des lieux des ENR – France 2017.....	26
6.1.2. Annexe : principaux impacts environnementaux des EnR et leviers d'atténuation	27

1. De quoi parle-t-on : les EnR, une diversité d'énergie et de technologies pour une réponse au défi climatique

Afin de limiter les impacts du réchauffement climatique en dessous de 2°C, l'Accord de Paris fixe des trajectoires pour limiter les émissions de CO₂. La production d'énergie, aujourd'hui majoritairement basée sur les énergies fossiles doit donc évoluer massivement. Les énergies renouvelables (EnR) sont un des piliers de cette politique climatique, avec la maîtrise de l'énergie et l'efficacité énergétique. Elles permettent également, pour les pays non producteurs d'énergies fossiles, d'augmenter leur indépendance énergétique.

Les EnR présentent une grande diversité de solutions énergétiques, du très petit système à la très grande centrale, adaptées aux principales cibles considérées, soit les entreprises, les collectivités territoriales, le grand public et le secteur de la production d'énergie (électricité, carburants). **En voici quelques exemples.**

1.1 Exemples pour les entreprises

Du secteur tertiaire :

- Castorama¹ a installé en toiture de son magasin d'Antibes, **250 kW_c de panneaux photovoltaïque** (1 340 m²) permettant de couvrir plus de 25% de ses besoins d'électricité. L'installation est conçue pour permettre 100% d'autoconsommation.
- La société Bénéteau² a installé pour son siège social (3 000 m²) de Saint-Gilles Croix de Vie, **une pompe à chaleur d'une puissance de 127 kW** pour ses besoins en chauffage (76 % des besoins), et de 119 kW pour ses besoins en climatisation (100 % des besoins) qui puise son énergie sur un champ de sondes géothermiques (23 sondes de 100 mètres de profondeur espacées de 10 mètres).
- L'aéroport de Paris Charles de Gaulle à Roissy a mis en place en 2012 **une chaufferie biomasse de 14 MW**, alimentée par 35 000 tonnes/an de plaquettes forestières. Avec une production de 78 000 MWh, elle permet de répondre à près de 26% des besoins de l'aéroport essentiellement pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, et d'éviter l'émission d'environ 18 000 t/an de CO₂.
- Air France récupère depuis 2015 893 MWh/an **d'énergie fatale** sur les groupes froids refroidissant le **Data Center** de son centre informatique de Valbonne pour répondre à la totalité des besoins de chauffage du site.

Du secteur industriel :

- La société Melvita Production à Lagorce a installé **80 m² de capteurs solaires thermiques** (environ 56 kW_{th}) pour son procédé industriel de lavage des cuves de production (taux de couverture proche de 100%) permettant une diminution de la consommation de gaz (-1,7 tonne/an de gaz propane) couplée à une réduction des transports qui alimentaient l'usine en gaz propane. Cette installation permet ainsi d'éviter l'émission de 6 tonnes de CO₂ par an.
- La société NESTLE, sur son site de production de Challerange, a mis en place en 2011 une **chaufferie biomasse de 7 MW, en substitution d'une chaudière fioul**. Alimentée par 15 000 tonnes/an de plaquettes forestières et avec une production de chaleur de 28 000 MWh, elle permet d'éviter l'émission d'environ 6 500 t/an de CO₂.

¹ Source : http://www.enerplan.asso.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=1667&Itemid=

² Source : <http://www.ademe.fr/chauffer-rafraichir-energie-renouvelable-geothermie-tres-basse-energie>

- En 2009, l'Oréal - CAP Vichy a choisi **d'installer des systèmes de récupération de chaleur sur les fumées** des chaudières, sur les groupes frigorifiques et sur les compresseurs d'air pour chauffer l'eau de lavage des cuves et équipements du site. En 2010, cet engagement a été complété par l'installation d'un système de **géothermie très basse énergie sur aquifère** avec thermofrigopompe pour le chauffage et le refroidissement des procédés et des locaux. Cet investissement a permis une économie globale de 6 300 MWh de gaz par an.
- En 2016, la **papeterie PALM** à Descartes a investi dans une solution de **récupération de chaleur fatale sur les buées de séchage** de 2 machines à papier permettant de valoriser en interne 35 000 MWh/an de chaleur

Du secteur agricole :

- La ferme avicole³ Le Gal à Moustoir-Aca a installé **39 m² de capteurs solaires thermiques** (environ 27 kW_{th}) pour chauffer l'eau de lavage de la casserole (taux de couverture proche de 60%). Cette installation permet ainsi d'éviter l'émission de 1,8 tonnes de CO₂ par an.
- Le Château Pontet Canet dans le bordelais a installé, pour alimenter 5 850 m² de bâtiments neufs et anciens avec une mixité d'usages (chauffage, climatisation eau chaude sanitaire des logements, château, bureaux, salle de réception, mais aussi ses procédés utilisant cuvier, chais, et stockage), **trois pompes à chaleur groupes d'une puissance unitaire de 158 kW en froid et 221 kW en chaud** qui puisent leur énergie sur un champ de sondes de 67 sondes de 100 mètres de profondeur et six de 60 mètres de profondeur.
- Le GAEC de l'Aurore dans le Doubs produit **1 300 MWh d'électricité et 1 600 MWh de chaleur à partir du biogaz issu de la méthanisation** de 7 500 tonnes d'effluents d'élevage et de déchets du territoire. La chaleur produite est valorisée sur l'exploitation agricole, dans le chauffage des habitations des exploitants, pour le séchage de fourrage et le chauffage d'une serre maraîchère.
- La SAS Bioénergie de la Brie en Seine-et-Marne **injecte 145 Nm³/h de biométhane, soit 13 000 MWh/an, dans le réseau de gaz naturel** exploité par GRDF et alimente ainsi l'équivalent de 3 500 foyers BBC (ou 1 800 foyers) pour le chauffage et la cuisson. Le biogaz est issu de la méthanisation de 14 000 tonnes d'effluents d'élevage, de déchets agro-alimentaires et de déchets de culture.

1.2 Exemples pour les collectivités territoriales⁴ :

A l'échelle de la ville :

- La ville d'Auxerre (Yonne, 35 000 hab.), après une étude menée en 2012, a mis en service en 2015 **une chaufferie biomasse de 8,5 MW** dont la chaleur est distribuée par **un réseau de chaleur de 5,3km**. La chaufferie permet de valoriser une ressource biomasse locale (17 000 tonnes/an), et d'éviter 10 900 tonnes de CO₂ par an. Le réseau de chaleur biomasse alimente notamment des logements sociaux, des groupes scolaires et équipements sportifs, pour un équivalent de 5 800 logements.
- La Commune de Montmélian (Savoie, 4 000 hab.) développe le solaire sur son patrimoine communal depuis 1982. Suite à l'installation de panneaux solaires thermiques, elle a réduit de 73 % la consommation de gaz d'un centre nautique et sportif, et elle produit avec des panneaux photovoltaïques plus de 320 MWh/an.
- A la Réunion, le village La Nouvelle situé dans le Cirque de Mafate expérimente une alimentation 100% EnR à base de **panneaux photovoltaïques** (7,8 kWc), associés à un système de stockage hybride

³ Source : <http://www.ademe.fr/installation-solaire-thermique-ferme-avicole-gal-a-moustoir-ac-56>

⁴ Source : <http://www.senat.fr/rap/r12-623/r12-62310.html#toc196>

composé de batterie (15 kWh) et d'une chaîne hydrogène (100 kWh). A terme, cette démarche pourra être étendue pour se passer totalement des groupes diesel.

A l'échelle de la communauté de communes :

- La Communauté de communes des Crêtes Préardennaises œuvre depuis 2002, pour une réappropriation de la question énergétique sur son territoire. En matière d'éolien, cette volonté a conduit à la naissance en 2004 du projet de **parc éolien citoyen : Ailes des Crêtes (puissance 2,4 MW)**. Le financement du projet est apporté par les citoyens (particuliers, associations, entreprises, collectivités) et 31 communes qui participent au financement du projet via Enercoop Ardennes Champagne. Les banques représentent seulement 20% de l'investissement total. Le parc produit 4 800 MWh/an, soit la consommation annuelle d'électricité de 1 500 foyers.
- En île de France, la **géothermie profonde**, développée depuis les années 1970, et puisant son énergie dans la nappe du Dogger située à 2000 m de profondeur, permet d'alimenter plus de 200 000 équivalent-logements via des réseaux de chaleur mis en place par les collectivités.
- Schneider Electric et Kyotherm investissent dans une solution de **récupération de chaleur fatale** sur le site d'ARCELOR Mittal de St Chély d'Apcher. Près de 12 GWh/an seront ainsi récupérés au niveau des fours de l'aciérie pour être valorisés à 75% en interne (procédés et chauffage de locaux), et à 25% **sur le réseau de chaleur urbain** de Saint Chely D'Apcher. Ce réseau, mis en service en 2015, est également alimenté par une chaufferie biomasse de 2,7 MWth et dessert 800 eq. logements.

1.3 Exemples pour le grand public :

A l'échelle individuelle :

- Les **chauffe-eaux solaire individuels**⁵ (typiquement de 3 à quelques kW_{th}), systèmes solaires combinés (typiquement de 5 à un peu plus d'une dizaine kW_{th}) ou les systèmes photovoltaïques (typiquement de 3 à 9 kW_c) permettent d'alimenter en eau chaude sanitaire, chauffage ou électricité l'habitat individuel, et de couvrir de 40 à plus de 100% des besoins, en fonction des dimensionnements.
- La Ville de Macon a installé pour un lotissement de logements sociaux à basse consommation d'énergie dix **pompes à chaleur individuelles réversibles** de quelque kW pour les besoins en chauffage (100 % des besoins), et de climatisation (100 % des besoins) qui puisent leur énergie sur huit sondes de 80 mètres de profondeur et deux sondes de 100 mètres de profondeur.
- Chaque année sont installés en France environ **400 000 appareils individuels de chauffage au bois**, principalement des poêles à bûches et à granulés. Le chauffage au bois fait baisser la consommation de chauffage électrique ou fioul de 40% et de gaz de 30% (source CEREN 2017). Les poêles à granulés de quelques kilowatts (classiquement de 3 à 9 kW) permettent une régulation automatique de la température.
- En Isère, des « Fonds Air » financés par l'ADEME et les collectivités locales permettent d'accélérer le renouvellement du parc **d'appareils au bois** vétustes par des appareils performants (Vallée de l'Arve, Grésivaudan, Pays voironnais, Grenoble). L'objectif est à la fois de **diminuer les émissions de particules** de ces vieux appareils et **d'améliorer le rendement énergétique** par des appareils au bois très performants (flamme verte 7 étoiles ou équivalent).

A l'échelle collective :

⁵ Source : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-chauffer-eau-et-maison-avec-soleil.pdf>

- La copropriété Hippocampe de Cagnes sur mer⁶ a installé **50 m² de capteurs solaires thermiques** destinée à alimenter 61 logements en eau chaude sanitaire (environ 35 kW_{th}) permettant de couvrir 68 % des besoins annuels. Cette installation permet ainsi d'éviter l'émission de 5,4 tonnes de CO₂ par an.
- Dans le cadre des **centrales villageoises**⁷, 41 sociétaires ont constitué la CVLA (pour Centrales Villageoises Lure-Albion) une structure de type SCIC-SAS dans l'objectif d'installer **six centrales photovoltaïque d'environ 9 kW_c**. Ces projets à l'échelle très décentralisée, fédèrent les initiatives individuelles autour de projets développés dans le cadre d'une dynamique citoyenne et territoriale.

Pour le secteur de la production d'énergie (électricité, carburants) :

- La **centrale photovoltaïque** de Cestas au sud de Bordeaux était la plus grande d'Europe, au 1^{er} décembre 2015, avec une superficie de 260 hectares pour une capacité installée de 300 MWc correspondant à environ 4 % de la puissance du parc photovoltaïque ;
- les **parcs éoliens** de Fruges situés dans les collines de l'Artois, dans le département du Pas-de-Calais, représentent aujourd'hui le plus grand ensemble éolien terrestre de France avec une capacité installée de 140 MW, correspondant à environ 1 % de la puissance du parc éolien français ;
- le **barrage de Grand'Maison** situé sur l'Eau d'Olle, dans le département de l'Isère forme le plus puissant ensemble hydroélectrique français avec une capacité installée de 1 800 MW, correspondant à environ 7 % de la puissance du parc hydroélectrique français ;
- La grande diversité des **déchets organiques et des secteurs du biogaz** : station d'épuration urbaine, Industries agroalimentaires, pharmaceutique, distillerie, papeteries, agriculture, ordures ménagères, biodéchets ménagers démontre le potentiel de cette EnR.
- La **bioraffinerie** de Pomacle Bazancourt dans la Marne, qui transforme principalement du blé et des betteraves en différents produits pour les secteurs de l'agriculture, de la chimie, du cosmétique comprend une unité de production d'éthanol carburant (capacité de production 280 kt/an, correspondant environ à 40% de la quantité d'éthanol et ETBE mis à la consommation en 2016 en France). Elle accueille également l'installation pilote du projet Futurol de production d'éthanol de deuxième génération. Une chaudière biomasse de 30 MW contribue à la production d'énergie d'un des industriels de la bioraffinerie.

Ces quelques exemples montrent la diversité des solutions EnR qui contribue notamment à renforcer le développement d'un tissu industriel diversifié s'appuyant sur la conception, la fabrication et l'installation des équipements, le développement des projets, l'opération et l'entretien des équipements. Ce tissu est un terreau fertile pour l'innovation à l'échelle des territoires, et repose sur des intervenants et porteurs de projets de tailles très variées, de l'installateur local d'équipements individuels EnR de quelques kW, à la multinationale de plusieurs dizaines de milliers d'employés développant des projets de plusieurs centaines de MW sur tous les continents.

⁶ Source : http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/eas-hippocampe_emr160.pdf

⁷Source : <http://www.centralesvillageoises.fr/web/guest/techniquebanon;jsessionid=A0A27AFB6EE02E97EAC566CA263CCFCC>

2. Etat des lieux, gisements, et dispositifs de soutien

2.1 Etat des lieux dans le Monde

En 2015, les EnR représentaient environ 19,3% de la consommation d'énergie finale dans le monde. Les deux premières sources d'EnR à l'échelle mondiale restent les usages traditionnels de la biomasse (cuisson et chauffage pour les populations les plus pauvres ; environ 9,1%) et les moyens modernes de valorisation des EnR⁸ (environ 10,2%). La chaleur renouvelable (biomasse, solaire et géothermie) représentait de l'ordre de 4,2%, l'hydroélectricité 3,6%, la production d'électricité renouvelable hors hydroélectricité (éolien, photovoltaïque, géothermie et biomasse) 1,6% et les biocarburants, 0,8%. Sur les 10 dernières années, le taux de croissance annuel moyen des renouvelables était de 2,8%, alors que le taux de croissance annuel moyen de la demande d'énergie finale était de 2%. Dans ce contexte, l'éolien et le photovoltaïque sont les deux filières qui connaissent la croissance la plus rapide, donnant naissance à deux filières industrielles majeures, globalisées et compétitives.

Avec la mise en place de politiques de soutien aux EnR dans un nombre croissant de pays, un cercle vertueux s'est confirmé : les politiques de soutien permettent l'installation de volumes significatifs, ce qui favorise la réduction des coûts, ce qui permet en retour de revoir les ambitions à la hausse, et ainsi de suite. C'est pourquoi, en 2016, l'AIE recensait 150 pays ayant des politiques de soutien aux EnR électriques, 75 avec des politiques de soutien à la chaleur renouvelable, et 72 avec des politiques de soutien aux EnR dans les transports.

En 2015, 70% des investissements en nouvelles puissances électriques concernait des installations EnR. La Chine arrivait en tête de ces investissements (31% du total), suivie de l'UE (19%) et des Etats-Unis (17%). Pour les EnR électriques, la puissance installée dans le monde croît chaque année entre +4% (2005) et +9% (2015).

Globalement, l'IRENA⁹ estimait en 2016 que le secteur des EnR employait 8,1 millions de personnes.

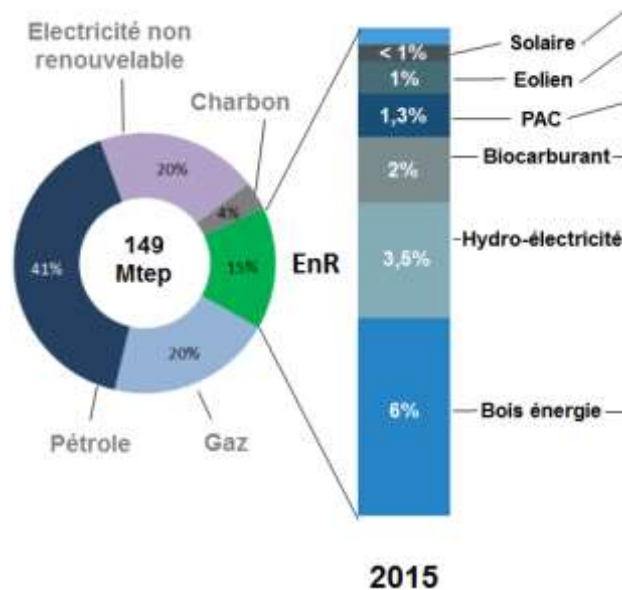
2.2 Etat des lieux en France

En 2015, les EnR représentaient 15% de la consommation d'énergie finale en France (23 Mtep de production d'énergie primaire renouvelable¹⁰). Les deux ressources principales sont le bois énergie (chauffage au bois notamment), pour 40% du total, et l'hydroélectricité, pour 20%. Arrivent ensuite les biocarburants et les pompes à chaleur (aérothermiques et géothermiques). Ces chiffres nationaux ne permettent pas de rendre compte de certaines disparités régionales, comme par exemple, le développement très important de la géothermie profonde en Île de France.

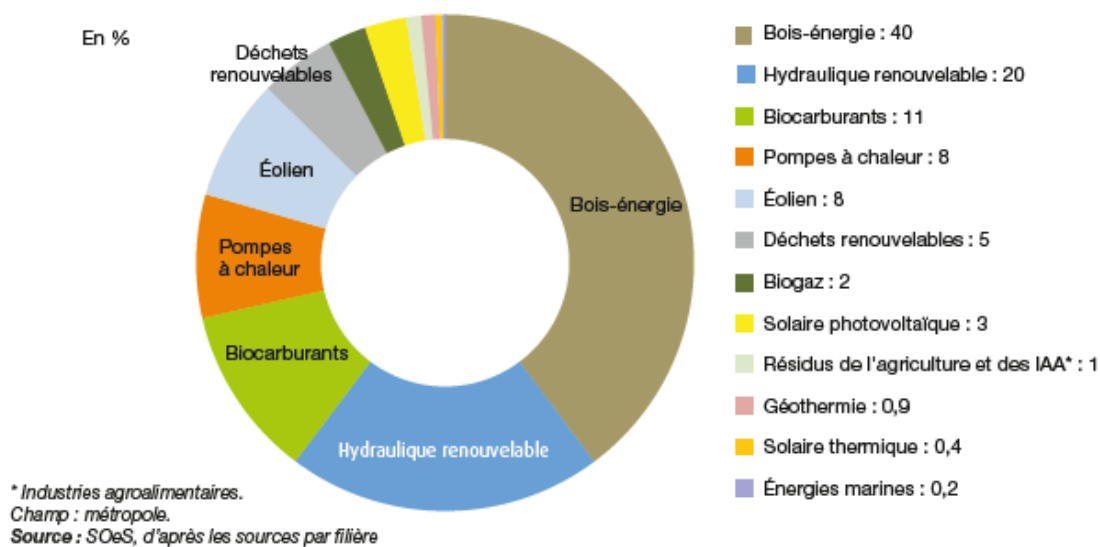
⁸ Incluant les nouvelles technologies d'utilisation de la biomasse (chaleur/électricité), le solaire thermique, la géothermie (chaleur/électricité), l'hydraulique, l'éolien, le solaire photovoltaïque et les biocarburants (Source : REN21, 2017).

⁹ http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_RE_Jobs_Annual_Review_2016.pdf

¹⁰ CGDD. Bilan énergétique de la France pour 2015. Novembre 2016. P.45.



Part de chaque filière dans la production primaire d'énergies renouvelables en 2015 (23,0 Mtep)

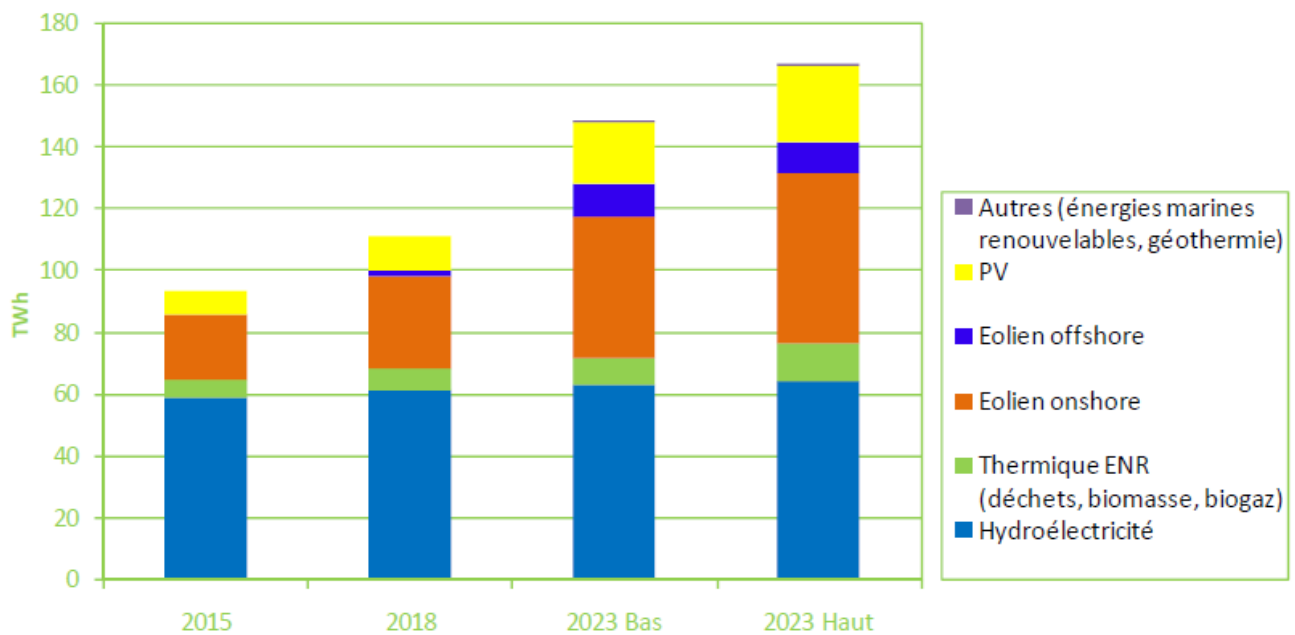


Les objectifs de développement sont ambitieux puisque la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) fixe l'objectif de 32% d'énergie d'origine renouvelable à l'horizon 2030. Les objectifs sont différents selon le vecteur énergétique : 40% de la production d'électricité sera renouvelable, et dans la consommation d'énergie finale 38% de la chaleur, 15% des carburants¹¹ et 10% du gaz seront d'origine renouvelable. Dans les départements d'outremer, où le coût d'importation des énergies fossiles rend les énergies renouvelables plus compétitives, cette même loi fixe un objectif d'autonomie énergétique dès 2030. La Programmation Pluriannuelle de l'énergie décline concrètement ces objectifs à plus court terme (aux horizons 2018-2023), technologie par technologie. Comme illustré sur les graphiques suivants, les technologies qui vont apporter la contribution la plus significative à ces objectifs sont dans l'ordre pour l'électricité, l'éolien, le photovoltaïque, et les bioressources, tandis que pour la chaleur, il s'agit de la biomasse, des pompes à chaleur (aérothermiques et géothermiques dans une moindre mesure), du biogaz, de la géothermie profonde et du solaire thermique.

¹¹ Pour les carburants, l'objectif de 15% inclut le recours aux différents vecteurs renouvelables biocarburants, biogaz, électricité ou hydrogène.

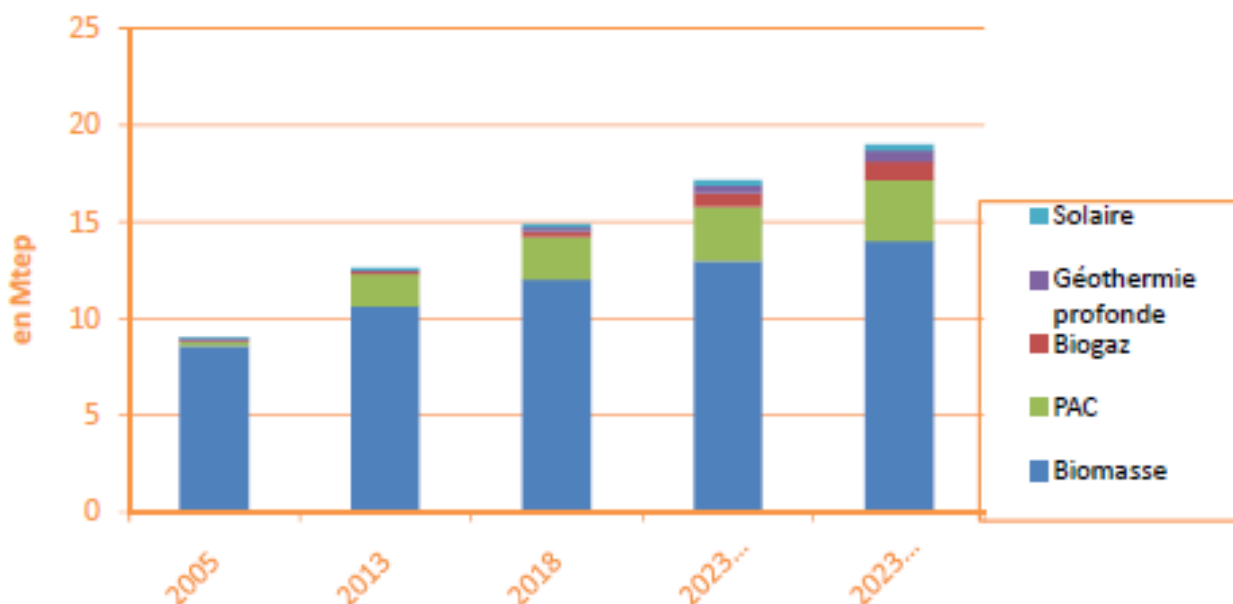
Les énergies renouvelables électriques

Objectifs PPE : production d'électricité renouvelable par filière



La chaleur renouvelable et de récupération

Objectifs PPE : consommation finale de chaleur par filière



Concernant le bois énergie, la consommation dédiée au bois domestique devrait rester stable jusque 2023 (7,4Mtep), mais avec une forte augmentation du nombre de foyers chauffés grâce à l'amélioration de l'efficacité des équipements et à l'isolation des logements¹². L'augmentation de la consommation de bois à venir provient donc principalement du développement des chaufferies dédiées aux secteurs du logement collectif, de l'industrie ou des réseaux de chaleur. Le bois représente encore un très fort potentiel de développement en France. En complément d'une meilleure valorisation des déchets de bois, un effort est à consacrer à la mobilisation du bois forestier qui représente une part importante du potentiel de bois supplémentaire, dans le respect d'une exploitation durable des forêts. La surface forestière de la France est au quatrième rang en Europe derrière celles de la Suède, de la Finlande et de l'Espagne. La surface des forêts a presque doublé depuis 1830¹³. Des mesures sont cependant à mettre en place pour favoriser la mobilisation de bois en forêt rendue difficile par le morcellement de la propriété forestière, son accessibilité, la structuration de la filière...

L'éolien est aujourd'hui une technologie mature techniquement et fiable avec un potentiel de développement encore très important en France, aussi bien à terre qu'en mer. L'année 2016 a connu une meilleure dynamique (environ 1350 MW installés), permettant de se rapprocher de la trajectoire de la Programmation Pluriannuelle de l'énergie (PPE). Cependant le déploiement de l'éolien terrestre reste à consolider, avec une meilleure concertation et un meilleur jalonnement sur l'ensemble des phases de planification et développement ; ce travail conduira à améliorer la perception des projets et à rationaliser leur durée de développement.

La filière photovoltaïque est dans une dynamique très positive + 23,4% en 2016 de la puissance cumulée et possède un potentiel de développement important, pour les installations au sol comme en toiture. A ce jour, 70% du parc total est situé au sud de la France métropolitaine où les coûts de revient sont jusqu'à 60% inférieur par rapport aux régions du nord de la France. Si la majorité des 390 000 installations est constituée de petites toitures résidentielles, les grandes installations au sol ou en grandes toitures représentent les 2/3 de la puissance installée.

Comment se positionne la France par rapport aux pays européens sur la production d'EnR ?

Compte tenu de la production et des taux de croissance actuels dans le développement des EnR, l'atteinte de l'objectif de 23% d'EnR dans la consommation finale d'énergie pour 2020 apparaît difficile, néanmoins la France était le 3^{ème} producteur d'EnR en Europe en 2014. Fin 2015, elle était également :

- 1^{er} pays européen pour la production de chaleur renouvelable à partir de la biomasse ;
- 2^{ème} pays européen avec la plus grande capacité hydroélectrique installée ;
- 4^{ème} pays européen avec la plus grande capacité éolienne installée (derrière Allemagne, Espagne, RU) ;
- 4^{ème} pays européen avec la plus grande capacité photovoltaïque installée¹⁴ (derrière Allemagne, Italie, RU).

¹² La PPE fixe comme objectif de passer de 8,6 Millions de logements équipés d'un appareil de chauffage au bois à 10,3 millions en 2023.

¹³ Selon IGN : la surface boisée de la France était comprise entre 8,9 et 9,5 Mha en 1830. Actuellement 16,7 Mha en métropole.

¹⁴ Confirmée pour fin 2016 (source : Snapshot of Global PV 2016, AIE CPT PVPS).

2.3 Des gisements nationaux très importants

Les potentiels techniques maximum des EnR en France sont très importants.

Pour les EnR électriques, par exemple, le potentiel théorique maximum basé sur les surfaces disponibles en adéquation avec la réglementation et la qualité des gisements est estimé à plus de 1 500 TWh/an¹⁵ (soit 3 fois plus que la demande d'électricité française actuelle), dont 130 TWh de production photovoltaïque sur grandes toitures commerciales et industrielles¹⁶. La France dispose aussi du deuxième gisement éolien¹⁷ d'Europe (terrestre et en mer) avec plus de 364 TWh (éolien terrestre standard), 331 TWh (éolien terrestre toilé), 80 TWh d'éolien en mer posé et 195 TWh (éolien flottant).

La mobilisation de la biomasse forestière présente également des potentiels importants puisqu'il serait possible, en modifiant les pratiques sylvicoles, de mobiliser 40% de bois en plus à l'horizon 2035 pour les besoins de production d'énergie¹⁸. Dans les visions prospectives de l'ADEME, l'usage de la biomasse forestière reste principalement orientée vers la production de chaleur, même si une diversification importante des usages est envisagée (cogénération chaleur/électricité, gazéification, biocarburants).

Les gisements de gaz vert sont également significatifs: jusqu'à 300 TWh de gaz vert pourrait être théoriquement produits à un horizon 2050 à partir d'un gisement d'origine biomasse, principalement via la méthanisation et la gazéification¹⁹. Cette estimation repose sur des hypothèses assez ambitieuses de rendement des cultures et de mobilisation de la biomasse, qu'il convient de considérer dans une approche durable globale tenant compte des autres dimensions : alimentation, vie des sols, biodiversité, stockage de carbone, biomatériaux... Elle dépend également des voies de valorisation énergétique de la biomasse (en chaleur, carburants, électricité ou gaz) qui dépendent d'arbitrages sur l'évolution conjointe des systèmes électriques, gaziers et des réseaux de chaleur.

Avant de recourir à la production EnR, la récupération de chaleur fatale vise à valoriser une partie de la chaleur perdue dans les procédés industriels ou de chauffage/refroidissement pour approvisionner en chaleur les industriels ou les réseaux de chaleur. L'industrie présente un potentiel de chaleur fatale de 109,5 TWh, soit 36 % de sa consommation de combustibles, dont 52,9 TWh sont perdus à plus de 100°C. À ce gisement s'ajoute 8,4 TWh de chaleur rejetés au niveau des Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères, des stations d'épuration et des data center. Par ailleurs, 16,7 TWh de chaleur fatale à plus de 60°C sont identifiés à proximité d'un réseau de chaleur existant, soit plus de 70% de l'énergie délivrée en 2013 par les réseaux de chaleur en France. Ce potentiel représente un peu plus de 1,66 millions équivalent-logements²⁰.

Au-delà de ces potentiels théoriques intégrant une partie des contraintes, il est aussi nécessaire de tenir compte d'autres contraintes de déploiement (capacités industrielles de déploiement, etc.) ou de mobilisation de la ressource (biomasse), d'accès à la ressource (géothermie), l'évolution des coûts des technologies ou encore l'acceptabilité sociale de leur déploiement.

Dans ses Visions prospectives, l'ADEME propose des trajectoires ambitieuses mais réalistes pour le développement des EnR en France, allant au-delà des objectifs fixés par la loi. Elles pourraient représenter 40% de la consommation finale brute d'énergie en 2035 et 70% en 2050.

¹⁵ Etude : Un mix électrique 100% renouvelable : analyses et optimisations.

¹⁶ A titre de comparaison, la production photovoltaïque 2015 était de 7,4 TWh sur un total de 546 TWh d'électricité produits en France.

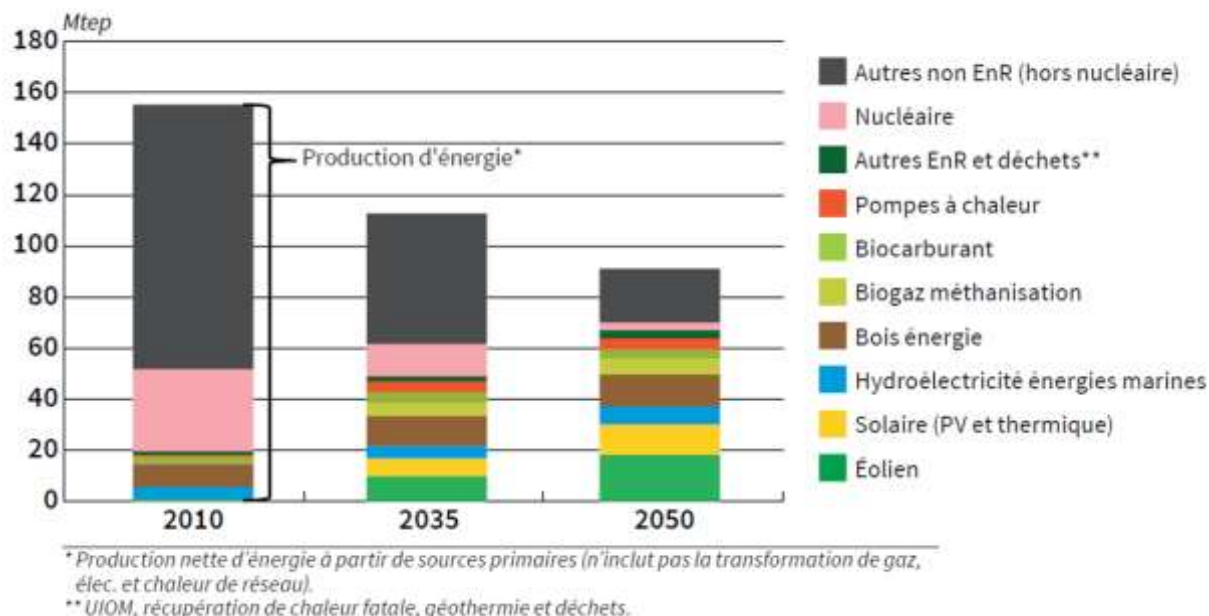
¹⁷ En fonction des contraintes de conflit d'usage et du ratio d'acceptabilité sélectionné.

¹⁸ Etude IGN, ADEME, FCBA : disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, février 2016

¹⁹ Etude ADEME-GRDF : vers un gaz 100% renouvelable, à paraître 2018

²⁰ « La chaleur fatale », ADEME, septembre 2017

Potentiel de développement des EnR dans les Visions de l'ADEME (variante "mix 90% EnR et power-to-gaz")



→ Les objectifs retenus par l'ADEME à l'horizon 2035 et 2050 correspondent à des gisements socialement acceptables, très en deçà des potentiels techniques, liés à des scénarios de développement réguliers et réalistes permettant le développement de capacités de production industrielles en France.

2.4 Les dispositifs de soutien en France et leur évolution

La filière des EnR en France est dynamique, innovante, avec un potentiel de développement massif tout en respectant l'environnement. Dans la perspective de la transition énergétique, leur soutien est encore nécessaire pour atteindre les objectifs ambitieux fixés par l'Etat.

- Les subventions accordées par le Fonds Chaleur permettent de rendre compétitif le choix d'une solution EnR pour les collectivités, l'industrie ou le secteur tertiaire. Cependant, le contexte économique actuel et la concurrence avec des cours du pétrole et gaz très bas rendent difficiles les décisions d'investissement en matière de chaleur renouvelable. Le rythme actuel de développement de la chaleur renouvelable étant insuffisant pour atteindre les objectifs de la loi, il est indispensable de porter dans la durée et de continuer à développer les outils de soutien comme le fonds chaleur tout en l'articulant avec la montée en puissance progressive de la contribution énergie-climat. Notons que le fonds chaleur présente un temps de retour de 3 à 5 ans pour la collectivité nationale, grâce aux importations évitées de pétrole et de gaz.
- La visibilité des soutiens publics est également indispensable pour les filières d'électricité renouvelables, qui, malgré leur compétitivité croissante, ne peuvent se rentabiliser uniquement sur le marché, celui-ci étant à un niveau trop faible pour permettre les investissements dans de nouveaux moyens de production, qu'ils soient renouvelables ou conventionnels.

Différents types de soutien existent et restent nécessaires par rapport à la maturité des filières : soutien à la R&D et à la démonstration pour les filières les moins matures, ou soutien à la généralisation pour les filières les plus matures dans un contexte structurel de prix faibles des énergies conventionnelles. Le tableau suivant résume les principaux dispositifs en vigueur.

Vecteur	Principaux types de soutien (mi 2017)
Chaleur renouvelable et de récupération	<ul style="list-style-type: none"> - Installation résidentielle : crédit d'impôt, eco-PTZ - Installation collective/industrielle/agricole : subvention aux études de faisabilité et à l'investissement par le Fonds Chaleur. Pour la chaleur fatale, c'est le dispositif CEE qui permet de couvrir une partie des besoins de financement. - TVA à taux réduit pour les réseaux de chaleur (sur part abonnement) et sur la part variable énergie pour les réseaux délivrant une chaleur à plus de 50% renouvelable.
Electricité renouvelable	<ul style="list-style-type: none"> - Installations < 100 kW : tarif d'achat en guichet ouvert - Installations 100 kW << 500 kW : tarif d'achat obtenu via appels d'offres - Installations > 500 kW : complément de rémunération obtenu via appels d'offres
Biogaz	<ul style="list-style-type: none"> - Installation collective/agricole : subventions aux études de faisabilité et à l'investissement par l'ADEME (Fonds Déchets ou Fonds Chaleur) selon puissance. - Installations < 500 kW : tarif d'achat + subvention - Installations > 500 kW : complément de rémunération (sans subvention) - Installations d'injection de biométhane : tarif d'achat + subvention
Biocarburant	<ul style="list-style-type: none"> - Obligation des fournisseurs de respecter un taux d'incorporation dans les carburants mis sur le marché
Hydrogène	<ul style="list-style-type: none"> - Projets de recherche et de démonstration pour la production à partir d'EnR en vue du stockage d'énergie, ou de production d'un carburant pour la mobilité. - Premiers outils de financement pour le pré-déploiement de la mobilité hydrogène.

Le Fonds chaleur est doté d'environ 220 M€ chaque année. Malgré l'importance de ce budget, il ne permet pas seul de susciter suffisamment d'investissements pour atteindre le rythme de + 500 à 650 ktep/an en plus chaque année, rythme qui est nécessaire pour atteindre les objectifs de la PPE. Il y a donc besoin de le renforcer jusqu'au moment où l'augmentation progressive de la contribution énergie-climat rendra la chaleur renouvelable plus compétitive que les énergies fossiles, tout en gérant efficacement la complémentarité, et la transition entre ces deux dispositifs.

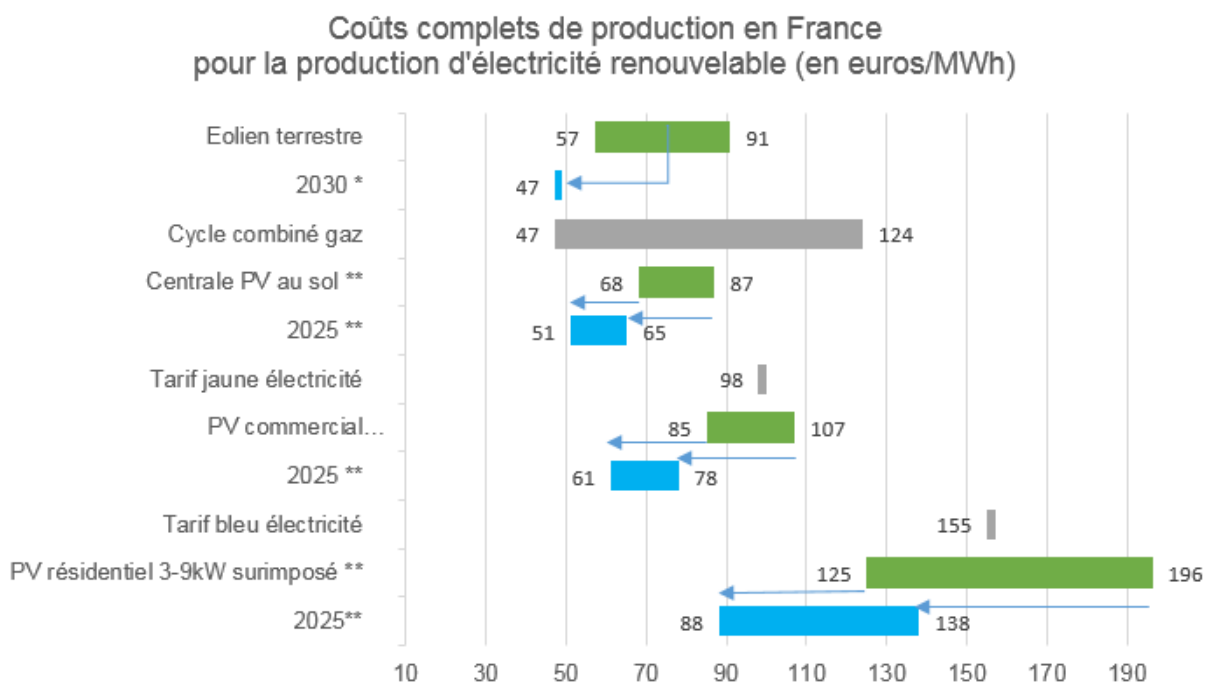
Concernant l'électricité renouvelable, le complément de rémunération se substitue progressivement au tarif d'achat. Cette prime vient s'ajouter au prix de vente obtenu sur le marché de l'électricité. Les appels d'offres deviennent la norme pour l'obtenir. Seules les petites installations ou les énergies non matures (énergies marines par exemple) peuvent encore bénéficier de tarifs d'achat ou obtenir un soutien via un guichet ouvert. La PPE fournit une bonne visibilité sur la programmation pluriannuelle des appels d'offres pour les différentes technologies.

Les garanties d'origine permettent de certifier le caractère renouvelable de l'électricité ou du gaz. Si elles ne constituent pas un mode de financement des EnR à ce jour²¹, il est important que le signal donné par les consommateurs à travers la souscription d'offres d'énergie verte puisse constituer, à moyen terme, un nouveau levier de financement qui pourrait progressivement prendre le relais de la CSPE (Contribution au Service Public de l'Électricité).

Pour les technologies non matures, des soutiens ad hoc sont mis en place par l'Etat, notamment via les appels à projets réalisés par l'ADEME, ou les financements des Investissements d'Avenir, par exemple pour financer des démonstrateurs ou des fermes pilotes (énergies marines, éolien flottant notamment). Ces soutiens aux filières les moins matures aujourd'hui et à leur intégration aux systèmes d'énergie (smart grids, systèmes de stockage...), sont indispensables pour les emmener vers la compétitivité et relever les défis de la Transition Énergétique.

3. Forces et atouts des énergies renouvelables

3.1 Une compétitivité croissante des EnR



Source : Coûts des énergies renouvelables en France, ADEME, édition 2016

* pour 2030, les estimations de coût pour l'éolien terrestre sont issues de l'étude ADEME 2017 "Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières"

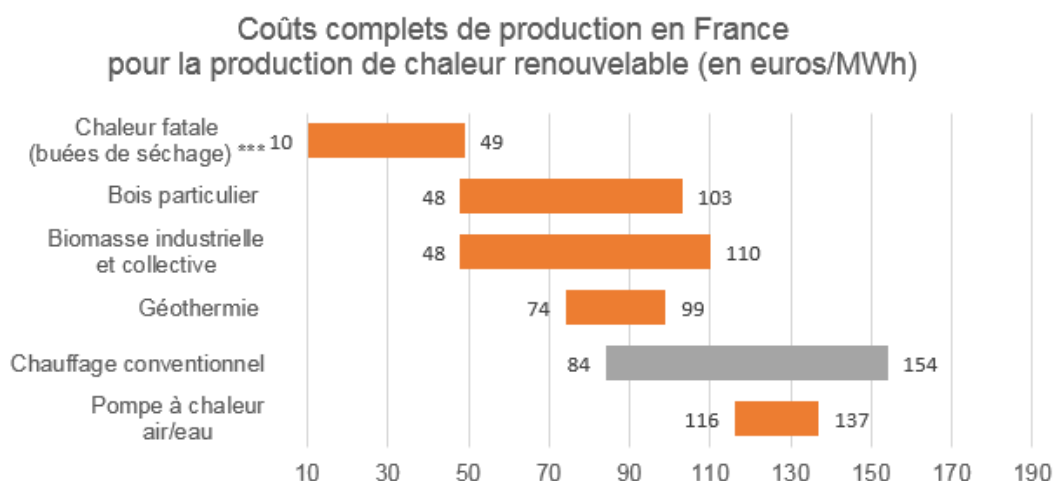
** Pour les centrales PV au sol, les données proviennent de l'étude ENERPLAN-ADEME 2017 "Bilan Perspective et Stratégie de la filière PV" et correspondent à des centrales en PACA (fourchette basse) et Pays de Loire (fourchette haute) ; pour le résidentiel, la fourchette haute correspond au nord de la France

²¹ Le développement des renouvelables électriques (EnR) est porté aujourd'hui collectivement à travers le mécanisme de la contribution au service public de l'électricité (CSPE).

Les progrès technologiques et l'industrialisation des EnR ont permis en France une baisse des coûts qui amènent les filières les plus matures à des niveaux compétitifs avec les technologies conventionnelles, et il existe encore des marges de progrès importantes pour la plupart des filières.

A propos de l'électricité renouvelable : l'éolien terrestre, avec une fourchette de coûts de production comprise entre 57 et 91 €/MWh, est le moyen de production d'électricité le plus compétitif avec les moyens conventionnels comme des centrales à Cycle Combiné Gaz (CCG). Les centrales au sol photovoltaïques (68 à 87 €/MWh), pour les plus compétitives, entrent également désormais dans cette concurrence directe avec les moyens conventionnels. Ces deux technologies ont l'intérêt de présenter des gisements très importants. Grâce aux progrès technologiques et à l'allongement de la durée de vie, ces deux technologies devraient converger vers des coûts de l'ordre de 50 €/MWh²² en 2030.

Sur les bâtiments (petites et grandes toitures), les coûts de production photovoltaïques les plus faibles (85 à 155 €/MWh) avoisinent désormais les prix d'achat de l'électricité sur les segments résidentiels et tertiaires, ce qui va petit à petit permettre un développement économique de l'autoconsommation.



Source : Coûts des énergies renouvelables en France, ADEME, édition 2016

*** Exemple de coût pour la récupération de chaleur issue de buées de séchage, source ADEME 2017 "intégration des EnR dans l'industrie"

A propos de la chaleur renouvelable : Chez les particuliers, les solutions bois reviennent moins chères (fourchette de 48 à 103 €/MWh) que leur concurrent conventionnel (gaz ou électricité, respectivement 84 et 154 €/MWh). Les pompes à chaleur air/eau sont également relativement compétitives avec des coûts de production situés entre 116 et 137 €/MWh. Cette compétitivité est toutefois en pratique masquée par deux barrières importantes (coût d'investissement initial élevé et contraintes d'usages pour le bois) qui justifient les soutiens publics facilitant le passage à l'acte.

Pour les installations de taille plus importante alimentant des bâtiments collectifs, les industriels ou des réseaux de chaleur, les EnR (notamment bois avec 48-110 €/MWh et géothermie avec 74-99 €/MWh) maintiennent difficilement leur compétitivité en coût global par rapport aux solutions collectives gaz (actuellement particulièrement basses) et souffrent du niveau encore trop faible de la contribution énergie-climat.

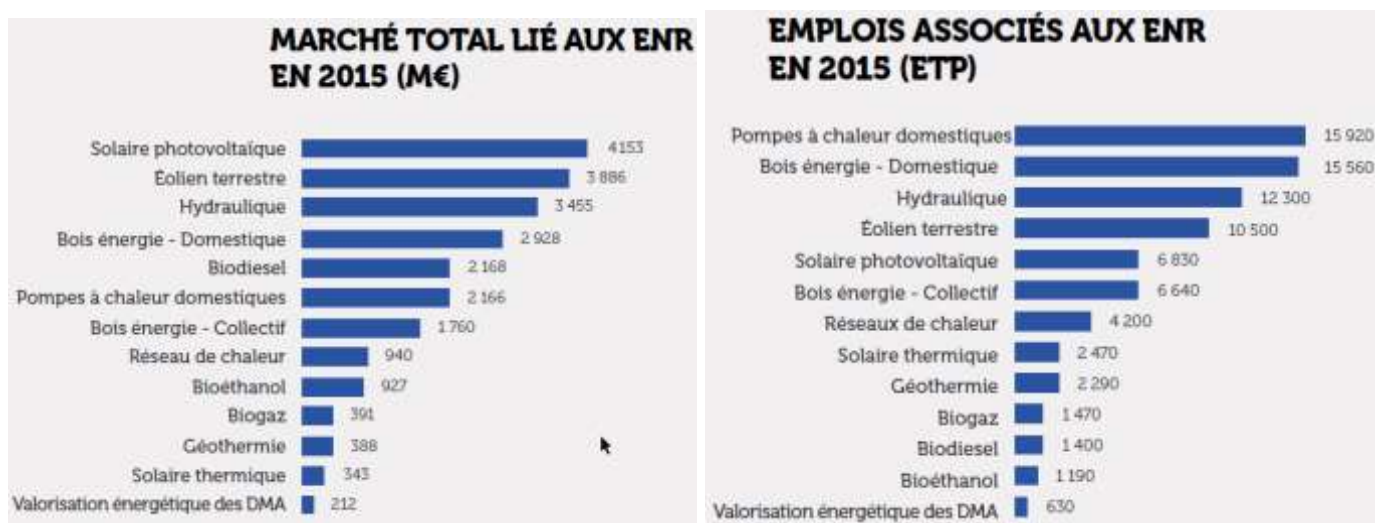
²² Source : caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien, ADEME, 2017 et Etude Bilan Prospective et Stratégie de la filière photovoltaïque, ENERPLAN et ADEME, 2017.

En secteur industriel, les solutions de récupération de chaleur fatale dites standards²³ sont plus compétitives (coût de revient inférieur à 50 €/MWh), même si les coûts d'adaptation à la configuration et la production du site industriel peuvent avoir un impact significatif sur le coût complet de production.

Les perspectives de baisse de coût évoquées sont encourageantes pour l'évolution du mix énergétique français, cependant, pour atteindre les objectifs fixés par Loi de Transition Energétique pour une Croissance Verte et la PPE, des soutiens de l'Etat restent nécessaires pour accélérer le rythme d'investissement, sécuriser les investisseurs dans cette phase initiale de transition du système énergétique, et tenir compte des prix structurellement faibles sur les marchés des combustibles fossiles et de l'électricité.

3.2 Des filières industrielles et des retombées économiques en croissance

Pour 2015, la production de biens et services associée au secteur des EnR en France est estimée à environ 24 Mds€²⁴, soit un doublement par rapport à son niveau de 2006. Après une forte progression de 2006 à 2008, correspondant au décollage des marchés éolien et photovoltaïque, la production associée aux EnR a vu sa croissance ralentir, puis se stabiliser autour de 20 Mds€ à partir de 2011.²⁵ Les années à venir devraient marquer le retour d'une période de croissance pour les marchés EnR au vu du cap ambitieux fixé par la LTECV, et confirmé dans la PPE, pour les différentes filières énergétique concernées. En effet, les objectifs fixés à moyen terme nécessitent une accélération rapide des rythmes annuels d'installation.



Au total, les emplois directs en France associés au déploiement des EnR et à leur exploitation sont passés de plus de 62 000 à presque 81 500 entre 2006 et 2015, soit 31% d'augmentation. Les emplois directs associés aux investissements dans les nouvelles capacités de production ont progressé de 19% sur la période 2006-2015 pour passer de 39 000 à 46 500. Parmi ces derniers, **les emplois industriels liés à la fabrication d'équipements ont progressé de 18%, passant de 12 400 en 2006 à 14 700 en 2015.**

²³ Etude de 4 scénarios de récupération de chaleur fatale, sur les 4 gisements à plus fort potentiel : Buées de séchage, condenseurs de groupe froid, échangeur sur fumées de fours et économiseur sur chaudière vapeur.

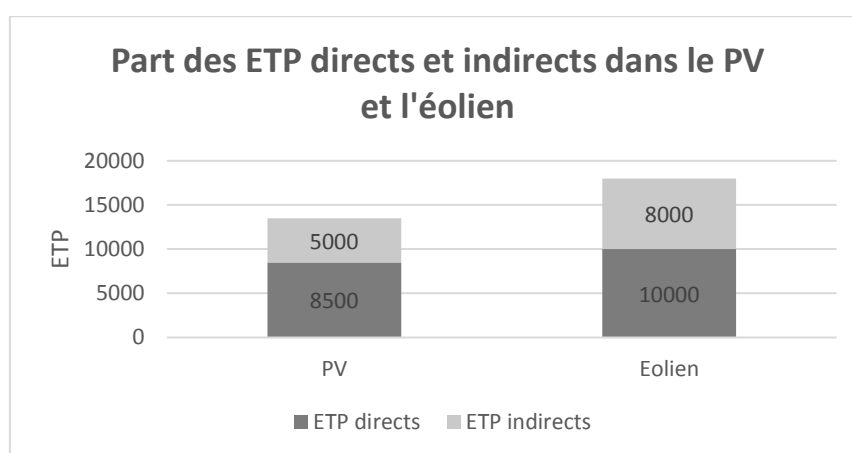
²⁴ Source : ADEME, Lettre Stratégie et recherche, N° 54 – JUIN 2017

²⁵ Depuis 2008, l'ADEME dresse un état des lieux régulier des marchés et des emplois relatifs aux principales activités liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et au développement des énergies renouvelables (EnR) en France. La dernière édition est accessible à l'adresse suivante : <http://www.ademe.fr/marches-emplois-lies-a-lefficacite-energetique-energies-renouvelables-situation-2013-2014-perspectives-a-court-terme>

Dans le même temps, les emplois directs d'exploitation-maintenance et ventes d'énergie ont cru de 52%, pour passer de 23 000 à 35 000.

Le secteur des EnR a également contribué positivement au solde de la balance commerciale nationale, même si une partie des équipements est importée pour certaines filières. La balance commerciale du secteur des EnR est ainsi positive de 4Md€/an (en 2015) si on prend en compte les économies d'importation de combustibles permises par le développement des EnR thermiques et électriques.

Un zoom sur les filières photovoltaïque et éolienne, en prenant cette fois en compte les emplois associés à l'ensemble de la chaîne de sous-traitants, montrent que les acteurs de ces filières pèsent respectivement pour près de 13 500 et 18 000 Emplois Temps Plein (ETP) directs et indirects. Les ETP indirects représentent ainsi entre 35% et 45% du total des ETP des filières concernées.



Un examen des 600 entreprises impliquées dans les activités spécifiques à la filière éolienne montre aussi que les petites et moyennes entreprises peuvent jouer un rôle central sur certains maillons de la chaîne de valeur des filières EnR : 49% des entreprises actives dans la conduite d'études et de contrôles affichent un chiffre d'affaire inférieur à 1 M€ en 2015. Ce taux est de 37% sur les segments du développement de projets et de 32% sur celui de l'exploitation-maintenance. En revanche, sur les segments de la fabrication de turbines, de composants et des travaux de génie civil et de raccordement, on observe un plus fort niveau de concentration des acteurs.

A un horizon prospectif 2050²⁶, l'évaluation macro-économique de scénarios de transition énergétique ambitieux, combinant une division par 2 de la consommation finale d'énergie à des taux de pénétration des EnR dans le mix compris entre 69% et 77%, montre un effet positif sur la croissance et l'emploi tout en augmentant le revenu disponible des français. Les impacts expansionnistes de la transition énergétique, tels que les emplois liés aux investissements dans les EnR, les baisses de factures énergétiques à moyen terme ou la redistribution des revenus de la taxation du carbone, l'emportent sur ses effets récessifs, tels que la baisse d'activité liée à une moindre production d'énergie. En 2050, selon le taux de pénétration d'EnR qui est considéré, c'est entre 3,6 et 3,9 points de PIB en plus pour l'économie française, par rapport à un scénario tendanciel, et près de 900 000 emplois supplémentaires. Si ces gains sont majoritairement liés aux investissements dans l'efficacité énergétique, les effets expansionnistes attribuables au déploiement accru des EnR pourraient encore être améliorés si les filières industrielles parviennent à mieux se structurer sur le territoire, ce qui permettrait de limiter le recours aux importations de composants.

²⁶ Source : Etude : un mix électrique 100% renouvelable ? analyses et optimisations, synthèse avec évaluation macro-économique, ADEME.

Comment se positionne la France vis-à-vis des autres pays d'un point de vue industriel ?

Si la politique de soutien aux EnR française s'est mise en place trop tard pour bâtir un écosystème industriel fort sur certains segments de la chaîne de valeur de l'éolien ou du photovoltaïque, elle se positionne néanmoins en tant que leader sur certaines filières :

- Chef de file européen en hydroélectricité ;
- Chef de file européen pour la production et la consommation de biodiesel ;
- Chef de file européen/mondial en géothermie pour la production de chaleur (sur réseaux de chaleur, pour le collectif et tertiaire), notamment dans le bassin parisien ;
- Précurseur et chef de file européen/mondial dans la géothermie pour la production d'électricité à partir des ressources géothermales profondes (roches fracturées) ;
- Précurseur et chef de file dans l'éolien flottant en référence aux appels à projet des Investissements d'Avenir fermes flottantes (lancés en 2015, 4 projets sélectionnés), et aux projets d'Appel d'Offres pour des fermes commerciales (date prévisionnelle de lancement 2018).
- Parmi les précurseurs mondiaux dans le domaine de l'hydrogène, pour le stockage stationnaire et les applications mobilité, avec un vivier de PME innovantes développant des solutions appliquées aux marchés.

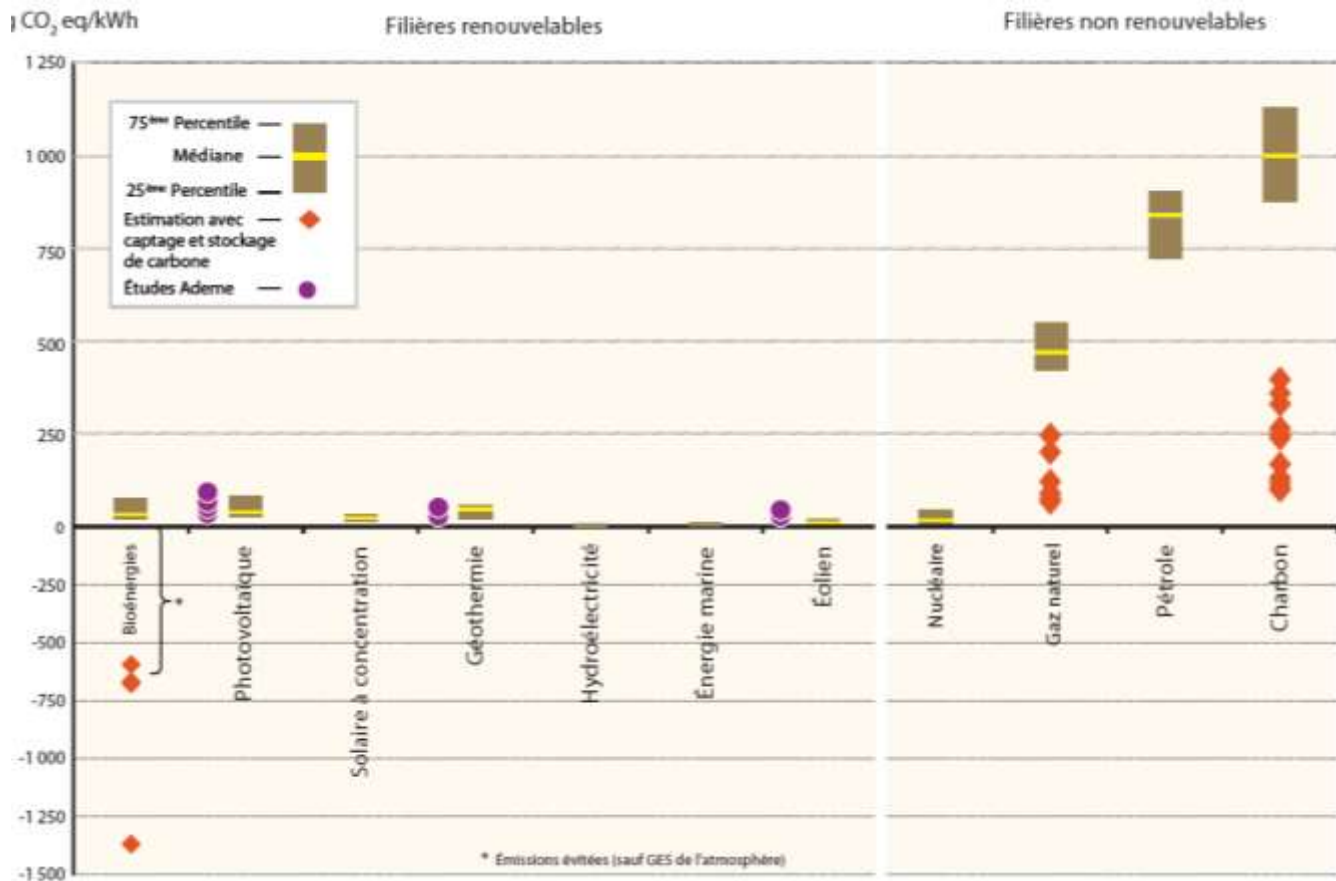
3.3 Des technologies EnR ayant globalement de faibles impacts environnementaux

Les impacts environnementaux comprennent les effets sur l'air, l'eau, les sols, la biodiversité, les paysages ainsi que les effets sanitaires sur l'Homme, les changements climatiques, la consommation de ressources renouvelables (eau, biomasse) et l'épuisement des ressources non renouvelables (eau fossile, ressources minérales, énergies fossiles...).

Une partie des EnR n'utilisent pas de source d'énergie conventionnelle en phase d'exploitation, et évitent ainsi, de fait, les pollutions directes des combustibles fossiles (chimiques, thermiques, olfactives), la génération de déchets toxiques et la consommation d'eau. Ainsi, à l'exclusion de la biomasse, les impacts environnementaux sont généralement concentrés sur la phase de fabrication des équipements. La biomasse peut avoir d'autres impacts, soit liés à sa combustion (pollution de l'air), soit liés à sa production, notamment via d'éventuels changements d'usages des sols directs ou indirects.

Dans ce contexte, pour pouvoir comparer les différents impacts des différentes énergies sur l'ensemble de la durée de vie (de l'extraction de matières premières à la fin de vie), on utilise la méthode de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). L'ACV est un outil d'aide à la décision à la fois pour choisir les processus et les technologies les plus performantes au niveau environnemental, mais aussi pour l'amélioration des technologies (écoconception). Les premiers résultats d'ACV de systèmes énergétiques à fort taux d'EnR montrent un impact à la baisse sur la majorité des indicateurs d'impacts (par exemple sur l'indicateur d'impact émission de gaz à effet de serre (GES) sur le cycle de vie, voir Figure 2.1).

Emissions de GES sur le cycle de vie des filières de production d'électricité, sans la prise en compte des changements d'usages du sol²⁷.



Ces mêmes études, montrent aussi que la mobilisation des matériaux courants (béton, acier, cuivre, aluminium) nécessaires pour une transition énergétique vers les renouvelables n'entraîne pas de surconsommations incompatibles avec les productions annuelles mondiales, ou les réserves géologiques existantes. Des travaux sont en cours pour analyser plus finement la consommation de matières premières, notamment celles considérées comme « critiques », pour la transition énergétique. Enfin, les technologies des EnR ne génèrent pas de consommations significatives de terres rares²⁸, et dans la plupart des cas où elles sont utilisées, des possibilités de substitution existent.

De nombreuses pistes existent pour encore atténuer les impacts environnementaux résiduels, et la diversité des filières EnR peut permettre d'adapter l'installation aux contextes environnemental et social des sites d'implantation. Par exemple, implanter une installation géothermique de production de chaud/froid pour les besoins d'un bâtiment patrimonial et de grande valeur architecturale, ou historique permet de valoriser une EnR en toute discrétion, et avec des impacts très faibles. Autre exemple, pour la filière photovoltaïque, un dispositif a été mis en place dans les Appels d'Offres pour favoriser les modules ayant l'impact CO₂ le plus faible ; ce qui conduit les manufacturiers à privilégier les procédés de fabrication les moins émetteurs.

²⁷ Source : Chiffres-clés Climat-Air-Energie 2016, ADEME. Graphique E37. L'ADEME soutient différentes études visant à évaluer l'impact environnemental de la production d'électricité à partir de sources renouvelables. Le graphique ci-dessus restitue certains des résultats issus de ces études et les met en regard des chiffres recensés par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC).

²⁸ Les terres rares sont un ensemble d'éléments métalliques du tableau périodique des éléments, aux propriétés chimiques très voisines. Contrairement à ce que leur nom peut laisser supposer, ces éléments ne sont pas rares : leur criticité est principalement liée au quasi-monopole actuel de la Chine pour leur extraction. Elles sont à distinguer des métaux critiques.

Au-delà des nombreux aspects positifs sur l'environnement que représente le déploiement des EnR, le lecteur trouvera en annexe un tableau listant les principaux impacts connus à ce jour²⁹ et certaines des mesures qui permettent de les atténuer.

3.4 Des filières de production au service d'une réappropriation locale de l'énergie

- Les différentes filières des EnR génèrent des retombées économiques locales en s'appuyant sur la mise en valeur de gisements d'énergie disponibles localement. La valeur ajoutée que peut capter un territoire dans la chaîne de valeur des projets dépend spécifiquement de chaque type d'EnR. Par exemple, pour l'éolien et le photovoltaïque, durant la phase d'investissement, ce sont avant tout les entreprises de BTP et de logistiques locales qui peuvent être sollicitées. Les sollicitations locales durant la phase d'exploitation-maintenance dépendront du type d'EnR (petit projet ou projet de grande puissance) ou de l'implantation d'un centre régional de maintenance à proximité ;
- Ces filières constituent aussi des vecteurs de développement économique dont plusieurs collectivités territoriales s'emparent pour en faire la colonne vertébrale de leur projet de territoire. Aujourd'hui, il existe déjà plus de 18 Territoires à Energie POSitive³⁰ et plus de 430 (au 1^{er} janvier 2017) Territoires à Energie Positive pour la Croissance Verte³¹. Dans tous les cas, cette orientation de politique publique mise sur l'énergie comme facteur de développement économique structurant, et de redynamisation du tissu industriel ;
- Les installations de production d'énergies renouvelables permettent aussi des retombées financières directes pour les collectivités locales via la fiscalité, contribuant ainsi à la dynamique territoriale, notamment des territoires ruraux. Pour exemple, une installation photovoltaïque permet des recettes fiscales locales annuelles d'environ 13 000 €/MW ; environ 12 400 €/MW pour l'éolien. Par ailleurs, la même installation photovoltaïque ou éolienne permet des recettes de location du terrain de l'ordre de 4 500 €/MW environ ;
- Dans le même ordre d'idée, le recours au financement participatif ou citoyen permet généralement d'accroître les retombées économiques locales. Il s'agit de diriger une partie de l'épargne ou des investissements des particuliers ou des collectivités vers des projets EnR locaux. Dans certains pays, l'Allemagne par exemple, plus de 45% des projets de production d'électricité renouvelable sont des projets coopératifs, participatifs ou citoyens. Cette typologie de financement des projets permet aussi aux citoyens de s'engager et de contribuer concrètement à la dynamique de la Transition Energétique, à l'investissement dans son territoire de vie, à l'innovation sociétale, à la dynamique coopérative, à la montée en compétences des personnes les plus impliquées, et à la réindustrialisation locale ;
- L'investissement dans la valorisation des ressources locales répond aussi à des enjeux sociétaux des territoires. Des bénéfices environnementaux sont ainsi recherchés. La valorisation raisonnée de la biomasse, par exemple, permet l'entretien des paysages, des espaces forestiers et boisés. Le

²⁹ En particulier, Les valeurs des émissions de CO₂ données en ACV ne prennent généralement pas en compte les absorptions/émissions liées aux éventuels changements d'usage et d'intensité de gestion des sols (et les impacts sur la qualité des sols et de l'eau ou sur la biodiversité, induits par les changements d'affectation des sols). Ces sujets font encore l'objet de recherche et dépassent le seul cadre des énergies renouvelables.

³⁰ Un territoire à énergie positive vise l'objectif de réduire ses besoins d'énergie au maximum, par la sobriété et l'efficacité énergétiques, et de les couvrir par les énergies renouvelables locales ("100% renouvelables et plus").

³¹ Un territoire à énergie positive pour la croissance verte (TEP-CV) est un territoire d'excellence de la transition énergétique et écologique. (...) La collectivité propose un programme global pour un nouveau modèle de développement, plus sobre et plus économe.

développement des usages électriques renouvelables (transport, pompe à chaleur) évite l'émission de particules polluantes dans certaines zones. La question des transports et des mobilités devient par ailleurs une préoccupation majeure, pour des questions de santé publique (milieu urbain) comme de désenclavement pour certains territoires (zones rurales). Les acteurs locaux se réapproprient ainsi leurs ressources énergétiques pour répondre à ces nouveaux enjeux (biométhane véhicule, électromobilité, hydrogène).

4. Points d'attention / opportunités d'amélioration

4.1 Des filières nécessitant encore un soutien public ciblé

- Les différentes filières des EnR se situent à diverses étapes de leur cycle de vie³² caractérisées par des niveaux de maturités technique, économique, industrielle ou commerciale divers. Pour les filières les moins matures sur ces différents niveaux, cela a pour conséquence un besoin d'actions ciblées et adaptées visant à soutenir l'innovation (yc. la démonstration), la structuration (formation certification, fédération des acteurs, etc.), l'industrialisation (soutien à l'innovation, au démonstrateurs, etc.) ou le déploiement des filières ;
- Le niveau actuel de la fiscalité carbone ne permet généralement pas de rendre compétitive les EnR, en comparaison des nouvelles installations réalisées avec des solutions conventionnelles, notamment dans le secteur de la chaleur. Pour l'électricité, l'éolien terrestre et une partie du photovoltaïque sont dans la fourchette de compétitivité, en termes de coût complet, mais pas par rapport à l'électricité produite par des installations déjà amorties qui n'assument plus que leurs coûts d'opération et d'entretien ;
- De manière générale et malgré des coûts d'exploitation et d'entretien faibles, les EnR présentent en effet un coût d'investissement en capital élevé qui constitue un frein majeur à leur émergence par rapport aux technologies conventionnelles à faible coût d'investissement. Les actions et soutiens apportés par les pouvoirs publics visent en premier lieu à lever ce verrou ;
- Pour les EnR électriques, les principaux leviers d'action sont les tarifs d'achat (ou compléments de rémunération) en vigueur et les appels d'offres qui permettent de déclencher les investissements. Pour les EnR thermiques, le crédit d'impôt pour la transition énergétique (pour les particuliers) et le fonds chaleur (pour les installations non individuelles) sont toujours nécessaires pour déclencher le passage à l'acte dans un contexte de prix structurellement bas du gaz naturel ;
- Pour les EnR moins matures ou pour leur meilleure intégration (smart grids, stockage), les pouvoirs publics apportent généralement une aide à l'investissement sur projets pilotes, de démonstration ou démonstrateurs.

³² Par exemple l'éolien flottant se situe au tout début de sa phase d'émergence avec 2 ou 3 unités déployés dans le monde, et un potentiel de croissance très fort, tandis que l'hydroélectricité se situe dans sa phase de maturité technique, économique, industrielle et commerciale avec un taux de croissance faible, aussi bien en France qu'à l'international.

4.2 La perception sociale

Suivant leur perception, leurs connaissances et leur affinité envers les technologies, les habitants sont plus ou moins enclins à soutenir l'installation d'EnR sur leur territoire.

- De manière générale, l'opinion des Français est très positive à l'égard des EnR (avec plus de 90% d'opinion positive³³). Cependant, l'acceptabilité d'installations EnR à proximité des lieux de vie des citoyens varie de 35% à plus de 90% en fonction de la source EnR³⁴.
- Ce constat souligne un degré d'acceptabilité généralement élevé, mais variable en fonction notamment du type d'EnR, de l'information disponible, de l'échelle de l'installation (individuelle de quelques kW, à l'installation industrielle de quelques centaines de MW) et des nuisances appréhendées ou perçues (bruit, qualité de l'air, paysage, biodiversité, sols, conflits d'usages, olfactive, etc.). Les déterminants de l'acceptabilité sociale ne sont pas encore tous bien connus, et font encore l'objet de recherche pour mieux en cerner les sources et enjeux.
- L'acceptabilité sociale peut être augmentée par l'information, la concertation, l'implication des citoyens dans les projets (qu'elle soit financière ou non), la bonne intégration des installations aux contextes locaux et la maximisation des retombées économiques pour les parties prenantes locales. La diversité des EnR permet cette nécessaire adaptation, notamment aux contextes locaux.
- Concernant la biomasse, l'acceptabilité sociale porte plus sur la qualité de l'air et les modes d'exploitation de la biomasse forestière. Le grand public est principalement attaché à la forêt pour ses fonctions autres que celle de production de bois (lieu récréatif, réserve de biodiversité...). L'augmentation des prélèvements de bois doit se faire en assurant la préservation des écosystèmes (biodiversité, sols), des différentes fonctions de la forêt et de ses autres usages. Parallèlement, il est nécessaire de sensibiliser les citoyens aux enjeux de la filière forêt-bois en général, et de l'exploitation forestière en particulier.

4.3 Un enjeu de formation et de montée en compétence des acteurs

- Il existe un besoin encore très important de faire monter en compétences les parties prenantes des services de l'état, des collectivités, des entreprises, des ONG, des prescripteurs (architectes, bureaux d'études, services d'urbanisme, etc.) et même le grand public pour orienter les choix vers les solutions EnR, améliorer l'émergence des projets notamment par une concertation adaptée, augmenter leur nombre et faciliter leur intégration locale.
- Concernant les petites installations EnR qui concernent principalement le grand public, le renforcement de la formation et la qualification des professionnels est indispensable dans l'objectif de maintenir un bon niveau de qualité des installations, les pérenniser et éviter les contre-références. En outre, l'amélioration des pratiques d'utilisation des appareils individuels de chauffage au bois, solaire thermique, ou pompes à chaleur est un levier important pour optimiser le fonctionnement de l'installation et réduire les impacts (par exemple, les méthodes d'allumage, le choix d'un combustible de qualité...).
- Les projets d'installation d'EnR portés par des collectifs citoyens et des collectivités, courants dans d'autres pays européens, se multiplient aujourd'hui en France. L'enjeu est double puisqu'il s'agit à la

³³ Voir : http://www.enerplan.asso.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=1736&Itemid=252

³⁴ Voir : <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/sondage-barometre-environnement-2015-air-enr.pdf>

fois de faciliter le financement des projets et concourir ainsi à accélérer le déploiement des énergies vertes sur nos territoires, mais aussi, voire surtout, de faciliter la concertation, l'intégration locale et l'appropriation des projets. Malgré ces atouts, nombreux sont les projets citoyens qui ne voient pas le jour en raison de difficultés liées au manque de ressources techniques, humaines et organisationnelles. Il est donc indispensable d'approfondir l'accompagnement à la montée en compétences des différentes parties-prenantes (en premier lieu collectif citoyens et collectivités).

- Finalement, la généralisation des EnR crée une opportunité pour l'émergence de nouveaux métiers sur des technologies variées ou d'évolution vers ces métiers (concepteurs, installateurs, opérateurs, chargés de maintenance, etc.). Ce contexte nécessite la mise en place de dispositifs d'accompagnement spécifiques à la montée en compétence, notamment en soutien des reconversions professionnelles, pour les employés des secteurs des énergies conventionnelles impactés par la Transition Énergétique.

4.4 L'intégration locale aux réseaux

- Selon les filières, les EnR sont soit consommées sur place, soit injectées dans des réseaux énergétiques, qu'il s'agisse d'électricité, de gaz ou de chaleur. Leurs caractéristiques (décentralisation, variabilité) induisent des modifications, ayant plus ou moins d'impacts sur la gestion de ces réseaux.
- Aujourd'hui, l'intégration à grande échelle des EnR (taux $\geq 70\%$) sur les réseaux énergétiques est possible techniquement, et économiquement, même pour les EnR variables. Ceci devrait permettre la valorisation des ressources importantes disponibles de manière très distribuée sur les territoires. L'estimation de ces impacts est particulièrement étudiée dans le cas des EnR électriques au travers de la notion de coûts d'intégration et recouvre plusieurs dimensions :
 - Les besoins de renforcement du réseau électrique nécessaires pour acheminer l'électricité produite de façon décentralisée sont pris en charge par les producteurs EnR au prorata des capacités futures à installer établies dans les schémas de planification S3REN³⁵. Il existe aujourd'hui des leviers pour réduire ces coûts, comme l'écrêtement de production pour un faible nombre d'heures par an ;
 - Les erreurs de prévisions liées aux aléas météorologiques de court terme sont la cause d'une prévisibilité moins bonne pour certains renouvelables, qui conduira à terme à un besoin accru en termes d'équilibrage de court terme sur le réseau électrique. Toutefois, ces besoins d'équilibrage sont encore largement dominés aujourd'hui par les aléas de la demande ;
 - Enfin, bien que les puissances d'EnR variables (éolien, solaire, hydraulique) installées ne produisent pas 100% du temps, il est faux de penser qu'il serait nécessaire de conserver une puissance fossile de secours équivalente pour faire face aux moments de faible production EnR. Le foisonnement de ces différentes EnR, la complémentarité de leur profil et la bonne utilisation de la flexibilité de la demande sont autant de moyens qui permettent de limiter les besoins de backup. Notons également que le système électrique métropolitain est déjà à ce jour particulièrement flexible (grâce à sa forte proportion d'hydroélectricité avec réservoir ou lacs de retenue) ce qui limite les besoins de stockage supplémentaire avant 2030.

³⁵ Schéma Régionaux de raccordement au réseau des EnR

- L'estimation des coûts d'intégration doit être réalisée avec une vision d'ensemble du système électrique et non pas moyen de production par moyen de production. En effet, le choix d'un mix électrique à faibles impacts environnementaux est un choix de société. Les coûts d'adaptation du système électrique qui en résultent ne relèvent en ce sens pas de la seule responsabilité des producteurs EnR mais concernent l'ensemble des parties prenantes au système. A un horizon de long terme, les travaux de l'ADEME montrent, dans cette approche « système », que les coûts d'intégration sont inférieurs aux gains occasionnés par les faibles coûts de production des EnR électriques.
- Pour accompagner cette intégration sur les réseaux électriques, les technologies des « Réseaux Electriques Intelligents » (REI) ou « Smart grids » sortent de leur phase de test et certaines commencent à être déployées à grande échelle. Il s'agit d'une part des différentes options de flexibilité (prévision et pilotage de la demande ou de la production, interconnexions, stockage) et d'autre part, des technologies permettant d'améliorer l'observabilité et le pilotage des réseaux de transport et de distribution (capteurs, postes numériques, ...). Le déploiement du comptage communicant, qui permet de mieux connaître l'état du réseau basse tension, est déjà en cours et va faciliter le développement de l'autoconsommation et de la production locale d'électricité renouvelable. D'autre part, le déploiement à grande échelle des autres solutions REI pour une intégration massive des EnR électriques sur les réseaux est quant à lui en train de s'amorcer. Les régions Bretagne / Pays de la Loire et PACA font à ce titre figure de précurseurs, avec des investissements déjà décidés, qui devraient dans les prochaines années progressivement s'étendre à l'ensemble du territoire métropolitain.
- Concernant les réseaux de chaleur, il est indispensable d'intégrer les projets dans une approche de planification territoriale qui doit identifier et hiérarchiser les solutions EnR locales et de récupération, et tenir compte de la complémentarité avec les réseaux existants (schéma directeur des énergies gaz, électricité, chaleur). Les réseaux de chaleur sont parfois l'unique moyen de valoriser des ressources de chaleur EnR centralisées comme la géothermie profonde, la chaleur fatale issue d'incinération ou de procédés industriels.
- Sur les réseaux de gaz, bien que le stockage soit plus aisé³⁶ et que la problématique de l'équilibre offre/consommation est de ce fait moins critique que dans le cas de l'électricité, les infrastructures sont également en train d'évoluer pour à la fois permettre d'insérer localement du gaz issu de sources renouvelables (biométhane) et gérer l'interfaçage entre les réseaux énergétiques (PowertoGaz pour la production d'H₂ et de CH₄ notamment).

4.5 Les leviers pour optimiser l'usage des sols

La transition énergétique va induire des modifications dans l'utilisation des sols, que ce soit via une plus grande part de la production agricole dédiée à la production d'énergie ou parce que certaines infrastructures de production d'EnR requièrent la mobilisation de surfaces supplémentaires. Dans un contexte plus général de croissance de l'artificialisation des sols (principalement liée à l'urbanisation), des synergies peuvent être imaginées pour optimiser l'usage des sols et limiter les conflits d'usages :

- La recherche de l'augmentation du rendement énergétique des installations de production d'EnR nécessitant de grandes surfaces (éolien, PV) ou du meilleur rendement agricole tout en limitant les pollutions (cultures énergétiques), ou en diminuant l'emprise au sol des infrastructures optimise l'occupation du sol.
- Le gisement de photovoltaïque installable sur les grandes toitures est supérieur à 120 GW et permet de limiter les conflits d'usage des sols et le changement d'affectation des sols.

³⁶ En France, la capacité des infrastructures de stockage de gaz dépasse déjà les 140 TWh.

- L'utilisation harmonisée des productions agricoles ou sylvicoles (dans une logique d'économie circulaire) permet d'optimiser l'espace et de coproduire énergie, aliments et/ou matériaux.
- La conception ou l'amélioration de systèmes de production intégrée d'énergie, d'aliments et/ou de biomatériaux sur une même parcelle, permet d'optimiser l'usage d'un espace : cohabitation énergie éolienne et agriculture ; centrale photovoltaïque au sol et élevage ou agriculture ; agroforesterie ; coproduction sur une même parcelle mais à des saisons différentes de cultures alimentaires et de CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique) pour la méthanisation.

5. Un fort potentiel de synergie entre les réseaux et systèmes énergétiques

- Les conversions énergétiques possibles entre les différents vecteurs énergétiques (électricité, gaz, chaleur/froid, bioressources) permettent d'envisager, à un horizon 2030 et plus, des couplages entre les réseaux énergétiques (électricité, gaz, chaleur/froid, et distribution de carburants) ainsi que la production de vecteurs énergétiques émergents (biocarburants, H₂, CH₄ de synthèse).
- Ce couplage entre les différents réseaux permettra de limiter les coûts d'un approvisionnement énergétique majoritairement renouvelable :
 - En permettant une valorisation sous forme de chaleur, d'hydrogène ou de méthane de synthèse des excédents de production d'EnR électriques variables disponibles en grande quantité en cas de faible demande ;
 - En permettant une optimisation technico-économique des différents réseaux. A titre d'illustration, la cogénération à partir de biomasse ou de chaleur fatale, couplées à du stockage thermique, permet d'intégrer une flexibilité entre la production de chaleur et d'électricité ;
 - En facilitant la conversion d'EnR, déjà stockées ou stockables à grande échelle, comme les bioressources pour en diversifier les usages possibles : la gazéification de biomasse par exemple permet d'envisager des potentiels de biogaz significatifs utilisables pour la mobilité ;
 - En permettant le stockage inter saisonnier à grande échelle des EnR variables (grâce au PowertoX notamment) ;
- Les technologies passerelles et de stockage permettant ces couplages entre vecteurs existent déjà (pompes à chaleur, résistances, méthaniseurs, électrolyseurs, turbines à gaz, stockage souterrain de gaz, batteries de nouvelle génération, compresseurs, etc.) avec des coûts stables ou à la baisse, ou sont en cours de test dans le cadre de démonstrateurs (« méthanateur », procédés thermochimiques et biologiques de production d'H₂, etc.) ou de projets pilotes de pré déploiement (piles à combustibles, etc.). Aujourd'hui, les politiques publiques doivent permettre de faciliter l'émergence, la diffusion de ces technologies et la réduction de leurs coûts.

6. Annexes

6.1.1. Etat des lieux des ENR – France 2017

Filières électriques

(Source : Le Baromètre des énergies renouvelables électriques en France 2016) : Chiffres SOeS pour les capacités installées en date de septembre 2016 / Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie 2017)

Eolien	Photovoltaïque	Hydraulique
Installée fin 2016 : 11 700 MW (Prod. 21 TWh en 2016) : en croissance Environ 10 500 emplois directs fin 2015 2 095 millions € de CA en 2015	Installée fin décembre 2016 : 7 134 MW (Prod. 7,7 TWh en 2015) : en croissance Environ 8 230 emplois directs fin 2015 4 439 millions € de CA en 2015	Installée fin septembre 2016 : 25 479 MW (Prod. 58,7 TWh en 2015) : stable Environ 12 390 emplois directs fin 2015 3 522 millions € de CA en 2015
Biomasse solide	Biogaz	Déchets urbains renouvelables
Installée fin septembre 2016 : 478 MW (Prod. 2,3 TWh en 2015) : stable Environ 6 800 emplois fin 2015 1 655 millions € de CA en 2015	Installée fin septembre 2016 : 385 MW (Prod. 2,1 TWh en 2015) : en croissance Environ 2 250 emplois fin 2015 600 millions € de CA en 2015	Installée fin septembre 2016 : 990 MW (Prod. 1,8 TWh en 2015) : stable Environ 595 emplois directs fin 2015 199 millions € de CA en 2015
Géothermie	Energies marines	Solaire thermodynamique
Installée fin septembre 2016 : 17,2 MW (Prod. 0,09 TWh en 2015) : stable	Installée fin septembre 2016 : 241 MW (Prod. 0,49 TWh en 2015) : stable	Installée fin septembre 2016 : 1 MW (sites pilotes) : stable Pas d'objectifs PPE

Filières chaleur

(Source : Les Baromètres énergies renouvelables EurObserv'ER 2016) : Chiffres en date de 2016 pour 2015 (solaire thermique, biocarburants, PAC)

Solaire thermique	Biocarburants	Pompes à chaleur
Installée en décembre 2015 : 2 059 MW _{th} (2 942 000 m ²) ou 104,9 MW _{th} installés durant 2015 (en décroissance).	Quantités consommées en 2015 dans les transports : Ethanol : 433 839 tep (en croissance) et Biodiesel : 2 562 445 tep (en croissance)	PAC installées fin 2015 : 4 638 908 aérothermiques et 148 675 géothermiques PAC vendues en 2015 : aérothermiques 405 680 (en croissance) dont 332 110 (air-air) et 73 570 (air-eau). 3 810 PAC géothermiques (en décroissance).

Géothermie	Biomasse	Biogaz
	Consommée en 2015 : 8,836 Mtep (en croissance) dont 0,721 Mtep dans les réseaux de chaleur	2 500 Nm ³ /h de capacité d'injection du biométhane pour la méthanisation centralisée et agricole.

6.1.2. Annexe : principaux impacts environnementaux des EnR et leviers d'atténuation

Eolien terrestre	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de CO₂ faibles (en ACV³⁷): le parc français émet environ 13 gCO₂ eq/kWh³⁸. ➤ Temps de retour énergétique : environ 1 an, soit l'un des plus courts parmi tous les moyens de production électrique. ➤ La R&D actuelle permet d'envisager des innovations pour augmenter les rendements ou substituer les matériaux à plus forts impacts. ➤ Impact sur les sols : l'éolien est compatible avec une double utilisation des sols (agriculture, forêt). Par exemple, avec 34 GW d'éolien installé en 2030, la surface du sol français occupée exclusivement par l'éolien³⁹ serait de 0,01%. La surface totale⁴⁰ des parcs en occupation au sol non exclusive serait de l'ordre de 0,6 % du territoire. ➤ Impact acoustique bien encadré par la réglementation, en cohérence avec les recommandations de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire. L'impact acoustique est en général surévalué mais se révèle plus faible dans la grande majorité des parcs effectifs. ➤ Effets limités sur la biodiversité. La mortalité des oiseaux et chauves-souris due aux éoliennes reste faible par rapport à d'autres activités humaines. Ces impacts restent un sujet d'étude et de suivi important, en particulier pour améliorer la collecte des données et définir les meilleures méthodes pour éviter, réduire ou compenser les impacts. ➤ Impact paysager : l'intégration paysagère est l'un des points d'attention de la phase de concertation, qui permet de limiter l'impact paysager et de mieux faire correspondre les éoliennes avec la vision des habitants de leur cadre de vie.
-------------------------	--

³⁷ Analyse de Cycle de Vie : ceci signifie que ces émissions de CO₂ prennent en compte l'ensemble du cycle de vie de la centrale de production et sont rapportées sur l'énergie produite pendant toute sa durée de vie.

³⁸ Ces valeurs sont amenées à décroître au fur et à mesure de la décarbonation des mix énergétiques, notamment des lieux de fabrication des équipements.

³⁹ La surface « exclusivement occupée par l'éolien » correspond aux sols artificialisés (fondations, tours éoliennes, transformateurs électriques, aires de stationnement, zones de manœuvre, chemins d'accès...).

⁴⁰ Correspondant au à la surface totale des parcs (périmètre extérieur des installations), dépendant essentiellement des contraintes aérauliques du site (les éoliennes doivent éviter d'être dans le sillage les unes des autres).

Photovoltaïque	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emissions de CO₂ assez faibles (en ACV) : entre 20 et 80 gCO₂ eq/kWh, selon la technologie, l'implantation de l'installation et le lieu de fabrication. ➤ Temps de retour énergétique : de l'ordre de 1 à 2 ans selon les technologies. ➤ La R&D actuelle permet d'envisager des processus de fabrication plus propres et moins énergivores (par exemple le silicium quasi mono-cristallin par rapport au silicium mono-cristallin). ➤ Depuis 2015, la filière française de recyclage des panneaux photovoltaïques est opérationnelle et permet de recycler, réutiliser ou valoriser 96% des matériaux des panneaux. Un Ecolabel Européen des modules photovoltaïques est en cours de développement pour s'assurer d'un très faible impact environnemental. ➤ Les centrales au sol peuvent entrer en concurrence avec d'autres usages des sols, même si elles pourraient être compatibles avec certaines formes d'agriculture (agrivoltaïsme) et contribuer à protéger certaines cultures de la chaleur et des canicules. A terme, pour limiter les conflits d'usages et l'artificialisation des sols, l'installation sur les infrastructures urbaines et les bâtiments doit être privilégiée.
Hydroélectricité	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de CO₂ faibles (en ACV) : de l'ordre de 6 gCO₂ eq/kWh⁴¹. ➤ Temps de retour énergétique : de l'ordre de 1 an. ➤ Les principaux impacts portent sur la biodiversité (ennoïement, brisure de la continuité écologique), les conflits d'usages et éventuellement sur la bioaccumulation de mercure dans les organismes vivants (plancton, insectes, poissons, animaux ou humains) ou les émissions de GES (méthane s'il y a ennoïement). En contrepartie, il y a création de nouvelles niches écologiques et possibilités de gestion de l'eau (irrigation, stockage).
Eolien en mer posé	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de CO₂ faibles (en ACV): estimé à 15 gCO₂ eq/kWh pour le parc français à 2023 (principalement lié à la fabrication des composants). ➤ Temps de retour énergétique : de l'ordre de 1 an. ➤ Phase de construction : selon la technique utilisée, la pose des fondations peut générer un impact sonore sous-marin lors du forage ou battage des pieux, pouvant nuire temporairement à certaines espèces. Le choix des périodes de construction ou l'utilisation de techniques particulières (rideau de bulles) peuvent limiter ces impacts. Un autre impact temporaire est la mise en suspension de sable et poussières marines lors des opérations de dragage ou d'enfouissement des câbles. ➤ Pendant la phase d'exploitation, les effets devraient être très limités car la présence humaine sur site sera très faible, et la localisation des centrales en pleine mer limite aussi les interactions possibles entre les éoliennes et la faune aviaire. L'effet des vibrations transmises dans l'eau devrait être négligeable ; en revanche, les fondations pourraient constituer des récifs artificiels ayant un impact positif sur la faune → synergie avec les autres acteurs de la mer. Le

⁴¹ La prise en compte de l'ennoïement sur le bilan GES peut toutefois avoir un impact significatif dans le cas de l'hydroélectricité avec réservoir ou lac de retenue.

	<p>démantèlement des installations ne devrait pas poser de problèmes particuliers. La coexistence avec certains usages de la mer pourrait être envisagée sous condition de compatibilité (pêche, aquaculture, tourisme industriel, etc.), d'expérimentation et de retour d'expérience.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Utilisation de terres rares dans les aimants permanents utilisés pour les turbines de forte puissance. Ce marché est de faible taille actuellement, mais en croissance. Des génératrices hybrides sont actuellement en phase de démonstration ; elles permettraient de limiter le recours aux aimants permanents.
Energies marines (yc. éolien flottant)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de CO₂ faibles (en ACV): estimées de 8 à 15 gCO₂ eq/kWh (principalement lié à la fabrication des composants). ➤ Nous manquons de recul par rapport aux impacts environnementaux de ces technologies, qui sont déployés actuellement seulement à l'échelle des démonstrateurs. Les effets sont toutefois relativement semblables à ceux de l'éolien offshore posé.
Géothermie électrique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Technologie EGS⁴² (en ACV): environ 37 gCO₂ eq/kWh (principalement lié au forage). ➤ Technologie conventionnelle (zone volcanique) : environ 47 gCO₂ eq/kWh (principalement lié aux fuites de processus en phase de fonctionnement). ➤ Temps de retour énergétique : de l'ordre de 1 an. ➤ La principale préoccupation concerne le besoin de développer des projets à forte intégration environnementale et sociale (limitation des impacts : rejets, bruit, odeurs et participation des populations).
Bois énergie	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de CO₂ faibles : 15 g CO₂eq/kWh utile (sans la prise en compte des éventuelles émissions liées aux changements d'intensité de gestion de la forêt) très inférieure à celles du gaz ou de l'électricité. ➤ Pour une même quantité d'énergie produite, le gaz et l'électricité sont meilleurs que le bois-énergie (chauffage collectif et chauffage industriel) vis-à-vis des émissions de particules dans l'air et métaux lourds dans les sols et de l'eutrophisation des eaux. De plus, le gaz est meilleur que le bois-énergie (collectif ou industriel) vis-à-vis de l'acidification de l'air. ➤ Qualité de l'air : les chaufferies de quartier ou industrielles présentent des émissions faibles en raison de l'obligation de mise en place de systèmes de filtration. En 2013, d'après le CITEPA, le chauffage au bois individuel représentait 29% des émissions nationales de particules PM10 et 43 % des émissions de PM2,5. L'utilisation de combustibles appropriés et de techniques de combustion efficaces permettent de limiter les émissions des polluants atmosphériques. Ainsi, un appareil individuel de performances équivalentes au label Flamme verte 7 étoiles peut émettre entre 5 et 30 fois moins de particules fines qu'un foyer ouvert, et jusqu'à 13 fois moins qu'un foyer fermé ancien, et a

⁴² Enhanced Geothermal System, tel que mis en œuvre sur le démonstrateur de Soultz Sous Forêt.

	<p>un rendement énergétique deux à sept fois plus élevé. Le développement de la filière bois énergie peut affecter la biodiversité forestière de manière différente selon les modes d'exploitation. Une gestion durable de l'exploitation forestière peut permettre de limiter les impacts, notamment sur la fertilité de sols, par exemple en limitant les exports de bois mort en récoltant de façon raisonnée les rémanents en forêt...</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Usage des sols et séquestration de carbone : L'intensification des prélèvements de bois pourrait avoir pour conséquence de diminuer le rythme de séquestration du carbone dans les écosystèmes. Ce manque de séquestration est compensé après un « temps de retour carbone » par la séquestration additionnelle dans les produits bois et par les émissions de CO₂ fossile évitées dans les secteurs énergétique et matériau⁴³. Pour minimiser cet impact, il est important de continuer à privilégier l'orientation vers des systèmes sylvicoles à vocation de bois d'œuvre dont les sous-produits permettent notamment de produire de l'énergie.
Pompes à chaleur	<p>L'impact le plus significatif est l'utilisation de fluides frigorigènes (risque de fuite) à fort potentiel de réchauffement climatique. La récupération des PAC est intégrée à la filière DEEE.</p>
Géothermie profonde pour la production de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Risques liés aux opérations de forage (mise en communication possible de plusieurs aquifères à des profondeurs différentes, gestion en fin de vie des sites...). Le dispositif réglementaire existant (code minier, loi sur l'eau) encadre de façon contraignante la réalisation des opérations et limite les risques de malfaçon. La récupération et le recyclage des installations de captage en sous-sol n'est pas envisageable. ➤ Possibilité d'épuisement de la ressource (apparition de poches de froid pour les opérations sur aquifère) ; ce problème pourrait être atténué par des productions alternées de chaud et de froid ou par une recharge du sous-sol (rafraîchissement des bâtiments, injection en été d'énergie solaire ou fatale (UIOM) excédentaire).
Réseaux de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Le contenu moyen en CO₂ des productions de chaleur des réseaux⁴⁴ est passé de 220 à 139 gCO₂/kWh lors des 10 dernières années. Ce résultat est lié à la forte pénétration des EnR et de récupération dans le bouquet énergétique des réseaux de chaleur, de 26% à plus de 50% sur la même période. Il existe une grande diversité des contenus CO₂ des réseaux liés à la multiplicité des sources d'énergie : La moitié des réseaux présente un taux moyen en dessous de 120 gCO₂/kWh.
Solaire thermique	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de CO₂ faibles (en ACV) : de l'ordre de 35 gCO₂/kWh (CESI sans considérer la contribution de l'appoint).

⁴³ voir Avis de l'ADEME « Forêt et Atténuation du Changement Climatique ».

⁴⁴ Source Enquête annuelle de branche SOES.

	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Temps de retour énergétique : de l'ordre de 1 an (CESI avec appoint électrique) et 1 à 2 an (CESI avec appoint gaz). ➤ L'impact le plus significatif est l'utilisation d'un appoint électrique ou fossile (taux de couverture solaire limité). Néanmoins, on constate une diminution par 2 des impacts CO₂ liés à l'ECS (taux de couverture de 50%). La récupération des systèmes solaire thermique est intégrée à la filière DEEE.
Méthanisation	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La méthanisation constitue un levier pour l'agriculture de réduire ses émissions de gaz à effet de serre. ➤ La méthanisation assure à la fois le traitement des déchets organiques, leur évitement à l'enfouissement, leur valorisation énergétique et un retour au sol de la matière organique. ➤ La France et l'Allemagne ont choisi des modèles de développement très différents. En favorisant le recours aux cultures énergétiques dédiées à la production de biogaz, le modèle allemand a induit le développement de la culture de maïs sur d'anciennes prairies, provoquant un déstockage de carbone des sols et une augmentation des émissions de N₂O (en lien avec la fertilisation des terres agricoles), une augmentation de l'érosion et une augmentation des impacts écotoxiques à cause de l'emploi de pesticides. ➤ Les recommandations pour optimiser les impacts environnementaux sont de maîtriser les distances de transport des substrats et des digestats, de couvrir les lieux de stockage de déchets et des digestats, de maximiser les temps de séjour de digestion et de respecter les bonnes pratiques à l'épandage.
Biocarburants	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Emission de Gaz à effet de serre réduite par rapport aux carburants fossiles réduites de 59 à 90% pour les biodiesels et de 49 à 72% pour les éthanol, sans considérer d'impact lié aux changements d'affectation des sols. La prise en compte d'impacts liés à des changements directs et indirects d'affectation des sols peut venir alourdir, voire annuler ces bénéfices pour certaines filières, en fonction des ressources utilisées, des pratiques agricoles, des écosystèmes remplacés, de la gestion des co-produits, etc. Les biocarburants avancés devraient permettre d'améliorer ce bilan à partir de 2030. ➤ Bilans énergétiques positifs par rapport aux carburants fossiles : les filières biodiesels présentent les bilans énergétiques les plus intéressants avec des réductions de consommation d'énergie non renouvelable, allant de 65% (esters d'huiles végétales et HVP) à 82% (esters d'huiles alimentaires usagées et graisses animales) par rapport à un gazole fossile. En raison de leur mode de production, plus énergivore, les éthanol affichent des niveaux de réduction allant de 49% (éthanol de blé) à 85% (éthanol de canne à sucre). ➤ Impact environnemental lié aux modes de cultures (non spécifiques aux biocarburants) : potentiels d'eutrophisation dus au lessivage des nitrates, aux émissions d'ammoniac et de NO_x supérieurs à ceux des carburants fossiles, à un niveau proche de celui des cultures alimentaires ; potentiels d'acidification, voire d'écotoxicité, supérieurs aux carburants fossiles (essence, diésel, gaz). Des impacts sur la qualité de l'eau et des sols et sur la biodiversité peuvent

	<p>également être importants lorsque l'on prend en compte les changements d'affectation des sols ; ils sont néanmoins variables.</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Des marges d'amélioration existent pour réduire les émissions de GES des filières biocarburants de 1^{ère} génération et plus généralement leurs impacts environnementaux : en particulier dans l'optimisation des pratiques agricoles et l'amélioration de l'efficacité des procédés de transformation.
--	---

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. www.ademe.fr / @ademe

