

Coûts de production des électricités renouvelables - perspectives

Méthodologie de calcul, chiffrage par mode de production et prise en compte des externalités

Electricité / Energies renouvelables

PREAMBULE

La France est endettée à un niveau élevé, ce qui l'oblige plus que jamais à compter. Pour financer son programme énergétique dont l'enjeu prioritaire est la décarbonation de l'énergie consommée en France, les pouvoirs publics doivent donc orienter les disponibilités des marchés sur les solutions de moindre coût.

Ce que recommande le Céréomé

1- Ecrire le cahier des charges simple d'une solution de moindre coût pour produire l'électricité dont aura besoin le pays. Par solution de moindre coût, le Céréomé entend une solution qui intègre tous les coûts pour l'économie française dans son ensemble :

- + faisant appel à la notion de coût complet tout au long du cycle de vie des équipements ;
- + tenant compte de la durée de vie effective des équipements et de leur taux de charge, des raccordements ;
- + mesurée pour une livraison à la prise (et non pas à la sortie de la production).

2- Déterminer un indicateur représentatif des enjeux économiques associés aux solutions de production, dans un contexte d'électrification croissante des usages.

3- Faire évaluer par une autorité indépendante les coûts d'électricité de production attendus en 2050.

En quoi les responsables publics sous-estiment-ils les coûts de production des électricités intermittentes ?

L'analyse du dossier « Futurs énergétiques 2050 » de RTE met en lumière une forte sous-estimation des Capex (coûts d'investissements) de ces sources d'énergie.

a) Photovoltaïque

RTE évoque avec raison une tendance à la baisse depuis plusieurs années, qui pourrait se poursuivre grâce notamment à l'amélioration des rendements des cellules et au développement de modules bifaciaux.

Pour autant, il se présente ici deux écueils :

+ Les niveaux de départ 2020 de l'analyse

Les niveaux de départ des fuseaux exposés en p. 467 figurant en Figure 11.7 ci-après ne correspondent pas aux chiffrages « Le coût des énergies renouvelables » de l'Ademe, tant dossier 2016 (rétrospectif) que dossiers 2020 et 2022 (chiffrages afférant à 2019-2020).

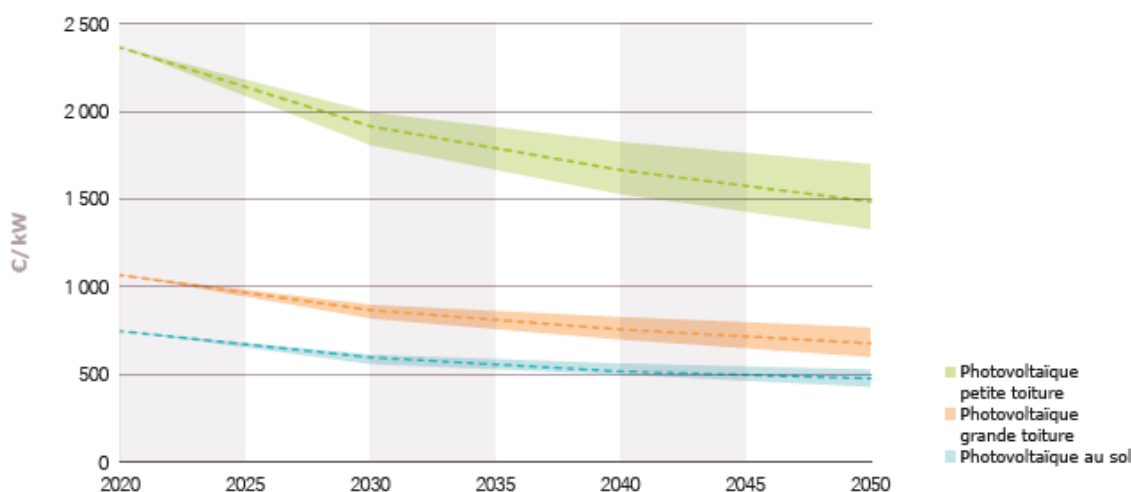
NOTA : RTE n'avait pas accès, lors de ses travaux sur les Futurs énergétiques 2050, aux travaux publiés par l'Ademe en mars 2022.

Le tableau ci-dessous portant sur le photovoltaïque au sol montre que :

- RTE fait le choix implicite de développer les mégaprojets de 10-30 MW, qui ne correspondent ni aux caractéristiques des recensements de friches industrielles (+ délaissés routiers, ferroviaires, et carrières abandonnées) accessibles réalisés par l'ADEME, ni aux critères de l'acceptabilité par les populations et par les acteurs du monde agricole (refus des projets d'agrivoltaïsme mangeurs d'espaces agricoles et pastoraux dont ce n'est pas la vocation) ;
- RTE aurait dû se cantonner aux projets les plus acceptables <2,5 MWc, et donc retenir un niveau de départ de 895 €/kWc, soit un écart de 17%.

CAPEX	Etude 2016	Etude 2020	Etude 2022
Résidentiel petites toitures - surimposé	2630	1735-2850	2859
Résidentiel grandes toitures - surimposé	1600	1080-1190	1080-1190
Photovoltaïque au sol - avec tracker > 250 kV	1324	ND	ND
Photovoltaïque au sol - moins de 2500 kV	ND	895	894
Photovoltaïque au sol - 10 à 30 MWc	ND	740	741

Figure 11.7 Évolution des coûts d'investissement en PV à l'horizon 2050 (hors raccordement)



+ Les fuseaux de baisse des coûts au-delà de 2020

Le Céréomé partage l'inquiétude qu'exprime RTE n'excluant pas pour l'avenir une diminution plus faible que prévu du coût des panneaux solaires compte tenu des tensions géopolitiques croissantes ayant déjà engendré une croissance du prix du silicium et, d'une manière plus générale compte tenu du retour d'une société d'inflation, de la hausse des matières premières, de l'acier, des métaux lourds etc. Il en résulte que la baisse des coûts évoquée par les fuseaux de la Figure 11.7 ne sera pas au rendez-vous. C'est une nuance de taille, dont RTE ne retire cependant pas les enseignements.

Aussi pour le photovoltaïque au sol convient-il - par prudence - de prévoir un objectif médian attendu 2050 de 650 €/ kW, et non pas un objectif légèrement inférieur à 500 €/ kW.

Ainsi RTE sous-estime le Capex du photovoltaïque au sol en 2050 de 25% à 30%. Il en va de même des autres catégories de solaires.

b) Eoliens

Voici les chiffrages de l'ADEME dans leurs versions successives 2016, 2020 et 2022 :

(€/KW)	Etude 2016	Etude 2020	Etude 2022
Eolien terrestre	1400-1700	1400-1620	1370 ¹
Eolien offshore posé au sol ²	3100-5100	3350-4025 ³	ND
Eolien offshore flottant ²	5200-7600	ND ³	ND

¹ « Les valeurs des CAPEX proviennent des études CRE33 (2014) « Coût et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine » pour la période 2010-2012, BIPs ADEME34 (2017) pour la période 2014-2016, et de données de la CRE sur les résultats aux appels d'offre 3 à 7 pour la période 2019-2020. On a supposé une baisse entre ces deux périodes »

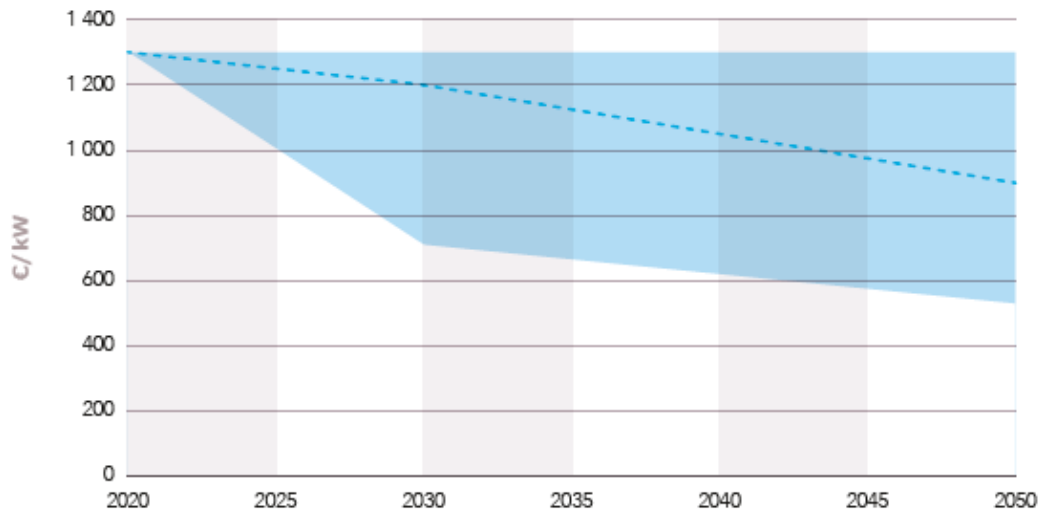
² totalement exonéré des coûts de raccordement

³ Posé au sol : CapexRoyaume-Uni, Pays-Bas, Allemagne ; Flottant : ND (pas de chiffrage afférent à 2019-2020)

b.1) Eolien terrestre

Le niveau de départ (1300 €/kW) exposé p. 468, Figure 11.8 n'est pas approprié :

Figure 11.8 Évolution des coûts d'investissement dans l'éolien terrestre à l'horizon 2050 (hors raccordement)



Non seulement il est inférieur au niveau figurant dans l'étude ADEME 2022 (1370 €/KW), mais en outre RTE n'avait pas accès à ce chiffre lors de ses travaux sur les Futurs énergétiques 2050. Noter que l'IRENA cité par RTE fournit un chiffre 2020 de 1,355 m\$ us/MW soit 1,576 m€/MW, et 2021 de 1,325 m\$ us/MW soit 1,541 m€/MW (\$ c/ € 2020)⁴.

Au demeurant, le mode d'établissement du chiffre 1370 € par l'Ademe « **on a supposé une baisse entre ces deux périodes** » laisse rêveur : comment peut-on asseoir la décision publique sur une telle « supposition » ?

Il convient plutôt et par prudence de retenir la fourchette 1400-1620 €/KW, soit 1500 €/kW en médiane, a fortiori compte tenu des réserves exprimées par RTE elle-même : les projets les plus puissants et les plus hauts sont les moins acceptés. C'est là pour tous ceux qui connaissent le sujet une réserve claire, s'agissant d'un critère essentiel au plan de la faisabilité, réserve dont cependant RTE ne retire aucun enseignement.

Au reste, la lecture de plans d'affaires mais aussi des comptes d'opérateurs démontre que bon an mal an l'on est bien sur ce niveau 1400-1620 €/kW. Par application du principe de prudence, le Céréme propose donc de ne pas établir un hypothétique fuseau de baisse, qui peine à convaincre, et par conséquent de placer le point de départ à 1500 €/kW puis de maintenir ce chiffre en logique plateau, plutôt qu'en fuseau car le fuseau n'a pas de sens pour les raisons évoquées par RTE elle-même.

Subsidiairement, il est clair que la hausse des matières premières, de l'acier, des métaux lourds et de tous les constituants d'une éolienne, publiquement déplorée par la filière dans la presse, ne va pas dans le sens des fuseaux de baisse exposés par RTE.

Il apparaît ainsi que RTE sous-estime le CAPEX de l'éolien terrestre en 2050 de près de 40%.

b.2) Eolien marin (posé au sol ; flottant)

Les niveaux de départ (2650 ; 3150 €/kW) exposés p. 468 / Figure 11.9 ne sont pas appropriés.

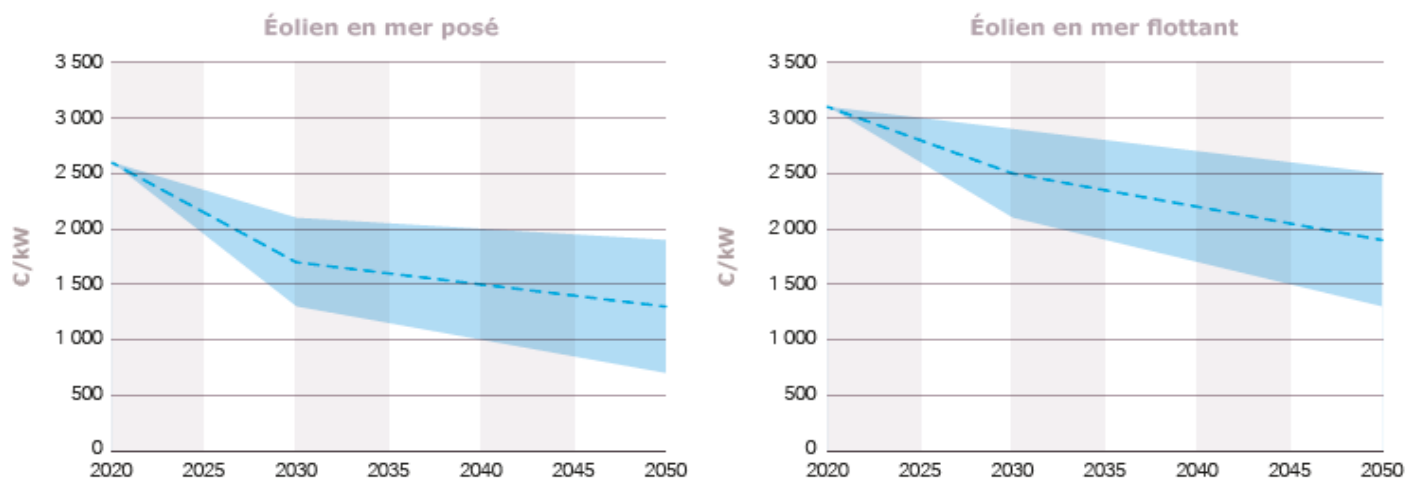
Précisions :

- l'ADEME ne publie pas de chiffres pour la France dans ses études 2020 et 2022
- l'IRENA citée par RTE fournit un chiffre 2020 de 3,185 m\$/MW us soit 3700 €/kW et 2021 de 2,858 m\$/MW us soit 3324 €/kW⁵, cependant sans distinction entre posé au sol et flottant.

⁴<https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2022/Jul/Renewable-Power-Remains-Cost-Competitive-amid-Fossil-Fuel-Crisis>

⁵ <https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2022/Jul/Renewable-Power-Remains-Cost-Competitive-amid-Fossil-Fuel-Crisis>

Figure 11.9 Évolution des coûts d'investissement de l'éolien en mer à l'horizon 2050 (hors raccordement)



Que constate-t-on en comparant les travaux de RTE et les études de l'Ademe ?

Projets financés (éolien posé au sol) ou en développement (éolien flottant fermes pilotes, notamment en Méditerranée), hors raccordements :

Les points de départ des fuseaux de RTE (respectivement 2650 € et 3150 €/kW) font apparaître une sous-estimation de respectivement 35% et 51% par rapport aux montants médians hors raccordements du tableau 2016 de l'Ademe (respectivement 4100€ et 6400 €/kW).

Il convient donc par prudence de retenir un niveau de référence 2019-2020 en fourchette de 3350 à 4020 €/kW (posé au sol) et de 3700 à 5000 €/kW (flottant).

Projets 2030 et + (flottant), hors raccordements :

Le niveau 2030 médian figurant dans le fuseau de RTE (2500 €/kW) laisse apparaître une sous-estimation de 36% par rapport au montant médian hors raccordements du tableau 2016 de l'Ademe (3400 €/kW).

Il apparaît ainsi que RTE sous-estime le CAPEX des éoliens offshore d'au moins 35%.

Les fuseaux de baisse des coûts annoncés par RTE sont incertains et des plus improbables, RTE précisant que « les références de coûts sont moins nombreuses et plus incertaines, dans la mesure où il n'existe à date aucun parc de taille commerciale dans le monde. La filière n'a pas atteint le même niveau de maturité que l'éolien en mer posé et présente donc des perspectives de coûts plus élevées à moyen terme. »

CONCLUSION

La décision publique devant s'appuyer sur des scénarios de coûts raisonnablement évalués et ne pouvant relever de « suppositions » ni de conjectures non prouvées, il est regrettable que figure dans le dossier préparatoire à l'atelier PPE Eolien terrestre la mention que « Selon l'Ademe, les coûts de production de l'éolien ont baissé de 18% entre 2015 et 2020. A l'horizon 2050, grâce aux progrès technologiques et aux économies d'échelle, les coûts de production des installations EnR devraient encore diminuer et ainsi être compris entre 24 et 54 €/MWh. »

Dès lors, et c'est la proposition du CéréMé, il est nécessaire de confier l'étude de ce sujet, central en matière d'efficacité de la décision publique, à une autorité indépendante et incontestable.

Quels niveaux de coûts de production de référence convient-il de retenir ?

Le Capex étant la composante principale du coût de production (les dotations aux amortissements représentent entre 44 et 48% des charges figurant aux comptes de résultats des opérateurs éoliens publiant leurs comptes), on vient de voir combien les pouvoirs publics ne sont pas fondés à invoquer une baisse durable de ceux-ci, du moins au titre d'un Capex dont la diminution est loin d'être acquise dans une économie qui renoue avec l'inflation.

Ce serait tromper l'opinion publique que d'asseoir la décision publique sur une telle affirmation.

Subsidiairement, en toute rigueur intellectuelle, il convient d'établir la prévision par des fourchettes raisonnablement accessibles.

a) Définition et méthode : LCOE ou pas LCOE ?

RTE affirme dans ses *Futurs énergétiques 2050* avoir renoncé à l'indicateur LCOE, indicateur biaisé qui ne représente pas le coût complet sur la durée de vie des équipements et ne permet aucune comparaison fiable.

Mais, après avoir semblé s'en éloigner, RTE revient au LCOE de facto et sans plus d'explications à partir de la page 472 par le truchement d'une « *comparaison approfondie avec d'autres références issues de la littérature* », autres références qui se réfèrent au LCOE :

- Ademe Coûts des énergies renouvelables et de récupération – 2020, données 2019
- IRENA source citée ci-dessus
- JRC « Deployment Scenarios for Low Carbon Energy Technologies », 2018⁶
- AIE Net Zero by 2050, 2021⁷

RTE en déduit, par un raccourci vertigineux illustré en Figure 11.11 une baisse durable du coût des EnR, et précise que le coût des grandes installations d'EnR sera inférieur au coût du nouveau nucléaire :

« Cette revue de littérature conforte la projection à la baisse des coûts des énergies renouvelables retenue dans les *Futurs énergétiques 2050*. Elle repose sur une hypothèse de poursuite des améliorations technologiques et de gains associés au passage à l'échelle, qui correspondent à la tendance observée au cours des dernières années, non seulement sur les coûts

d'investissement et d'exploitation mais aussi sur les rendements et facteurs de charge des installations.

Dans les différentes publications recensées, les coûts rapportés à l'énergie produite baissent ainsi de :
entre 15 % et 50 % pour l'éolien terrestre ;
entre 30 % et 75 % pour l'éolien en mer posé ;
entre 35 % et 60 % pour le photovoltaïque

... tout en concédant le caractère artificiel de cette affirmation, ainsi est-il évoqué des corrections portant sur les raccordements, dont RTE précise que « *l'ajout de cette composante rehausserait les coûts d'environ 15 €/MWh pour l'éolien en mer*⁸ ».

Le Céréme pour sa part ne récuse pas l'utilisation du LCOE, pourvu qu'elle soit équitable et réponde aux cinq précautions ci-dessous :

- 1- justification des taux de disponibilité opérationnelle et des facteurs de charge moyens retenus
- 2- durées de vie réalistes
- 3- taux d'actualisation identique
- 4- iso-fiscalité
- 5- prise en compte des dimensions complémentaires suivantes :
 - coûts système associés au scénario considéré : raccordements et renforcements, interconnexions, flexibilités et stockages pour pallier l'intermittence éolienne et solaire
 - coûts de démantèlement réels (raisonner tout au long de la vie des installations)
 - coûts environnementaux, aussi complets que possible selon l'état de l'art (incluant paysages-patrimoine et biodiversité), le cas échéant certifiés par l'autorité environnementale compétente.

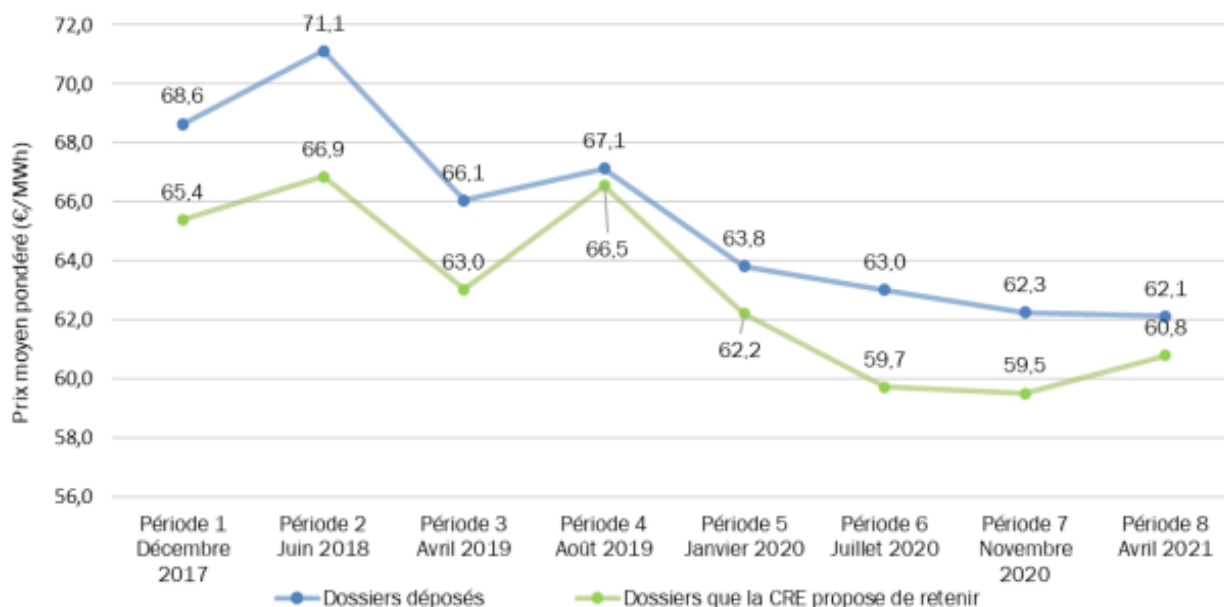
b) Les niveaux de prix souscrits dans les appels d'offres les plus récents confirmeraient-ils une baisse des prix des électricités renouvelables ?

D'un côté la Commission de Régulation de l'Énergie (CRE) observait mi-2021 une baisse de 10% des prix souscrits entre 2017 et 2021, plus exactement entre 2017 et début 2020 compte tenu d'une légère remontée des prix constatée depuis 2020, cf. tableau page suivante.

⁶ <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC112915>

⁷ https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZero2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

⁸ selon les informations reçues lors du débat public EOS MED, 15 €/MWh est la partie basse de la fourchette réelle, notamment pour les projets d'éolien flottant éloignés du rivage et nécessitant la création de postes intermédiaires.



De l'autre elle relevait que ce constat dissimule un contournement des règles, précisant dans⁹ son avis du 17 juin 2021 et le confirmant par sa délibération du 6 janvier 2022¹⁰ qu'une partie de cette baisse tient au contournement observé de la procédure d'appel d'offres : certains porteurs de projets développent une partie de leurs parcs au travers du guichet ouvert ouvrant droit dans la limite de 6 mâts à un soutien de 72 à 74 €/MWh puis candidatent à l'AO pour les mâts résiduels de leurs parcs en présentant un tarif artificiellement tiré vers le bas, ne reflétant pas les coûts réels de la filière et leur procurant au global un avantage. Afin d'éviter cet effet d'aubaine, la CRE a recommandé de modifier le cahier des charges afin de prévenir ce procédé, ce que le ministère n'a toujours pas pris en compte.

c) Les perspectives

Il ressortait de la Délibération N°2021-169 de la CRE du 17 juin 2021 portant avis relatif aux 7 projets de cahiers des charges d'appels d'offres pour le soutien à la production d'électricité d'origine renouvelable pour 2021-2026 que si le ministère entend engager ces AO sur la base de prix plafonds de 72 €/ MWh pour l'éolien terrestre (90 €/ MWh pour le PV au sol), pour autant la CRE recommande de ramener ces prix à 65 €/ MWh (éolien terrestre), 70 € (PV < 5 MWc), 60 € (PV > 5 MW).

On observera ici que l'éolien offshore est hors concours, les dernières références connues (moyenne des prix résultant des six premiers appels d'offres français) s'établissant à 145 €/MWh :



Il faut mettre de côté le cas particulier de Dunkerque (44 €/MWh), précédent non significatif pour trois raisons :

- la profondeur en mer du Nord près de la côte n'a rien à voir avec les autres mers bordières françaises (→50 m) ;
- le fond sablonneux de Dunkerque est plus facile à travailler que les fonds rocheux ;
- la Cour des Comptes dans son rapport délibéré le 15.09.2021 publié en décembre 2021 détaille les différents coûts « externalisés », en d'autres termes offerts à l'opérateur de ce contrat.

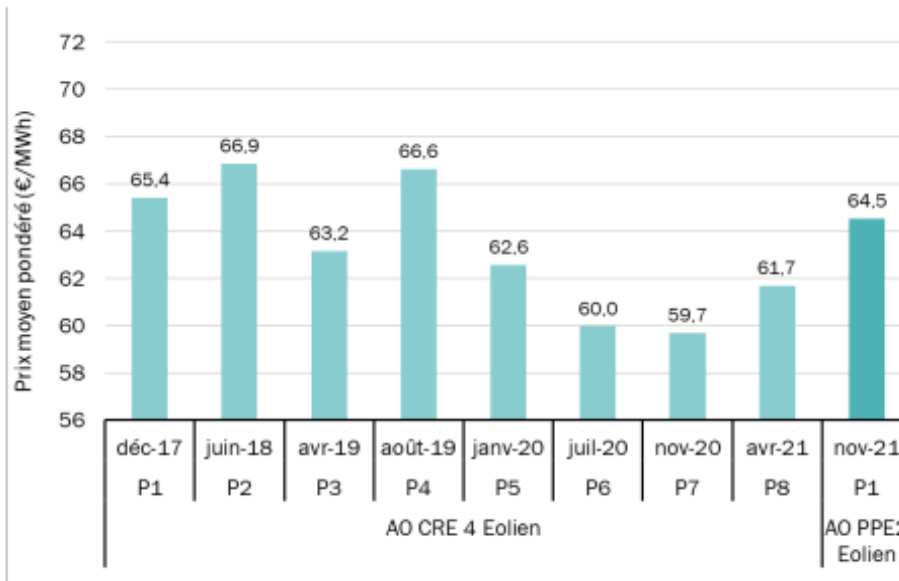
Il ressort de ce qui précède que le ministère ne croit pas moins aux niveaux de coûts annoncés par RTE pour l'éolien terrestre, non plus que pour le PV au sol.

⁹ <https://www.cre.fr/Documents/Deliberations/Avis/deliberation-de-la-cre-du-17-juin-2021-portant-avis-relatif-aux-sept-projets-de-cahiers-des-charges-d-appels-d-offres-pour-le-soutien-a-la-producti>

¹⁰ <https://www.cre.fr/Documents/Appels-d-offres/appe-d-offres-portant-sur-la-realisation-et-l-exploitation-d-installations-de-production-d-electricite-a-partir-de-energie-mecanique-du-vent-imp#:~:text=Candidater%20C3%A0%20l'appel%20d'offres&text=Le%20candidat%20doit%20d%C3%A9poser%20son,14%20octobre%202022%20C3%A0%2014h>

Dès lors, comment le ministère peut-il annoncer dans le dossier préparatoire à l'atelier PPE précité que « A l'horizon 2050, grâce aux progrès technologiques et aux économies d'échelle, les coûts de production des installations EnR devraient encore diminuer et ainsi être compris entre 24 et 54 €/MWh » ?

Il ressort enfin de la délibération précitée N°2022-02 de la CRE du 6 janvier 2022 que la CRE elle-même a dû relever de 5% le prix moyen pondéré qu'elle propose par rapport à l'AO précédent :



Évolution du prix moyen pondéré des offres que la CRE propose de retenir par rapport aux périodes du précédent appel d'offres portant sur des installations comparables*

CONCLUSION

Les niveaux de prix souscrits dans les appels d'offres les plus récents ne confirment pas une baisse des prix des électricités renouvelables en ce début des années 2020.

Quels niveaux de coûts de production en base 2020 ?

L'analyse du Céréomé - décomposition selon la nature des coûts, ici limités aux coûts quantifiables - figure au lien suivant :

[Comparaison-des-coûts-complets-de-production-de-lelectricite](#)

Type de coût	Éolien terrestre	Éolien en mer posé	Éolien en mer flottant	PV résidentiel (< 9kW)	PV commercial (9 kW - 1 MW)	PV au sol (> 1 MW)
Au niveau de la centrale électrique (€/MWh)						
A - OPEX COUT DU COMBUSTIBLE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B - OPEX COUTS INDIRECTS	12,4	18,3	33,0	11,9	10,7	20,0
C- CAPEX INVESTISSEMENT INITIAL	56,3	61,6	74,6	123,4	82,1	43,7
D- INTERETS INTERCALAIRES	2,3	2,5	3,0	3,1	2,1	3,5
E- COUT DE RACCORDEMENT AU RESEAU	22,7	17,6	21,7	12,8	7,4	3,6
F- PROVISION POUR DEMANTELEMENT	0,6	3,5	2,6	0,2	0,2	0,3
LCOE - Total des coûts de la centrale	94,3	103,5	134,9	151,4	102,4	71,1
Coûts système associés* (€/MWh)						
Coûts d'équilibrage	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Coûts de profil (ou coûts de back-up)	10,0	10,0	10,0	12,5	12,5	12,5
Total des coûts système	10,5	10,5	10,5	13	13	13
Coûts externes quantifiables** (€/MWh)						
Coûts pour la société des GES	0,8	0,8	0,8	2,4	2,4	2,4
Coûts de la pollution de l'air hors GES	0,7	0,7	0,7	6,0	6,0	6,0
Coûts de la pollution visuelle/sonore	5,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0
Total des coûts externes quantifiables	6,5	3,5	3,5	8,4	8,4	8,4
LCOE - TOTAL COUTS QUANTIFIABLES	111,2	117,5	148,9	172,8	123,8	92,5

Conclusion générale

Quelle que soit la source (Ademe, Céréomé, Roland Berger, Irena), on observe que les niveaux de coûts de production des électricités renouvelables 2019-2020 ne correspondent pas à ceux figurant dans le dossier *Futurs énergétiques 2050* de RTE, qui semble les avoir sous-estimés.

Quant aux perspectives de fuseaux de baisse annoncés, rien ne vient les garantir : ni les propres analyses de RTE ni les délibérations de la CRE, et encore moins les constats actuels et perspectives d'évolution du prix des matières premières et des constituants des installations lourdes que sont les installations d'électricité renouvelable.

Dès lors, et considérant que les choix relevant de la décision publique, choix s'inscrivant dans le temps long s'agissant de l'électricité, doivent toujours être assis sur les analyses économiques les plus robustes, le Céréomé propose qu'il soit confié à une autorité indépendante et incontestable le soin d'éclairer cette question centrale des coûts de production attendus des différentes énergies, incluant les autres énergies décarbonées.

Il en va de la compétitivité de notre économie mais aussi des grands équilibres économiques et sociaux de notre pays.



WWW.CEREME.FR

CONTACT@CEREME.FR
63, RUE LA BOETIE
75008 PARIS