

IMPACT DE L'ÉOLIEN TERRESTRE EN FRANCE : UNE CRÉATION NETTE DE RICHESSE

De 2012 à 2030 : 2,2 milliards € de valeur ajoutée nette en
France et plus de 35 000 emplois créés



Étude économique

Octobre 2022

A S T E R **è** S
études, recherche & conseil économique

PRÉAMBULE



Le cabinet ASTERES a été mandaté par CGN Europe Energy pour travailler sur l'impact économique de l'éolien en France.

Les économistes d'ASTERES ont bénéficié d'une totale indépendance dans la conduite de cette étude. Les sources de l'ensemble des données utilisées sont disponibles dans l'étude.

Les propos tenus ici n'engagent que le cabinet ASTERES.



Entre 2012 et 2030, la filière éolienne terrestre en France devrait créer plus de 2 Mds€ de valeur ajoutée et plus de 35 000 emplois, net des effets de substitution sur les autres énergies, notamment le nucléaire et les énergies fossiles. Cette étude se décompose entre une analyse des dix dernières années, qui permet de chiffrer l'impact de l'éolien en 2021, et une projection sur les dix années à venir.

En se substituant au nucléaire et aux énergies fossiles, l'éolien terrestre a créé 1,1 Md€ de valeur ajoutée nette en 2021 et plus de 17 900 emplois nets sur dix ans. La valeur ajoutée directe et indirecte nette créée par le développement de la filière s'élève à 570 M€ en 2021, à laquelle s'ajoutent 568 M€ de valeur ajoutée créée par les effets d'entraînement sur le reste de l'économie. Le développement de la filière éolienne a également permis la création de presque 10 700 emplois directs et indirects entre 2012 et 2021. Les effets en chaîne ont permis de créer 7 200 emplois supplémentaires sur la période. Ces emplois et cette valeur ajoutée sont présents dans l'économie en 2021 et se sont déployés depuis dix ans.

- **L'évaluation de l'impact économique net du développement de la filière éolienne sur les dix dernières années nécessite de prendre en compte les effets de substitution.** La hausse de la production éolienne s'est réalisée au détriment d'autres sources d'électricité et l'impact économique de l'éolien doit intégrer ces effets de substitution. En outre, la perte de valeur dans les énergies substituées est différente lorsque la baisse repose sur des fermetures de centrales ou sur une baisse du facteur de charge de centrales toujours en activité. Asterès estime que depuis dix ans, 63% de la production éolienne supplémentaire s'est substituée à du nucléaire, dont 23% à la fermeture de Fessenheim, 27% s'est substituée au charbon, dont 27% à des fermetures de centrales, et 10% s'est substituée au fioul, dont 9% à des fermetures de centrales.
- **Le développement de la filière éolienne a créé 889 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte en France et plus de 16 000 emplois. En parallèle, 318 M€ de valeur ajoutée et 5 500 emplois ont été perdus dans les autres filières (nucléaire et fossiles) par effet de substitution.** L'estimation de la valeur ajoutée directe et indirecte logée en France distingue trois cas de figure : l'installation d'éoliennes, la fermeture de centrales existantes et la baisse de charge des centrales qui restent ouvertes. Pour chaque source d'énergie électrique concernée (éolienne, nucléaire, charbon, fioul), des études et des données publiques permettent d'évaluer la part de valeur ajoutée directe et indirecte en France rapportée à l'investissement, au coût total d'exploitation ou aux coûts variables. Pour l'éolien, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France s'élève à 36% de l'investissement et 66% des coûts pour la phase exploitation. Pour le nucléaire, la valeur ajoutée directe et indirecte représente 84% des coûts d'exploitation, utilisés comme référence pour les fermetures de centrales, et 67% des coûts variables, utilisés comme référence pour les baisses de facteur de charge. Ces mêmes indicateurs sont à 60% et 14% pour le charbon et à 60% et 9% pour le fioul. Ces taux de valeur ajoutée permettent d'évaluer un montant de valeur créée ou détruite en France et un nombre d'emplois créés ou perdus en France pour chaque énergie.
- **Les effets d'entraînement nets du déploiement de l'éolien en France se chiffrent à 568 M€ en 2021 et plus de 7 200 emplois sur dix ans.** La valeur ajoutée directe et indirecte nette logée en France implique des commandes auprès de fournisseurs et des consommations par les salariés. Ces deux stimuli créent des effets d'entraînement dans l'économie chiffrés grâce au Modèle d'Impact d'Asterès (MIA) qui permet de suivre l'ensemble des flux économiques générés par une entreprise ou un secteur.

À horizon 2030, l'impact économique du développement de la filière éolienne devrait être à nouveau positif, à hauteur de 1,1 Md€ de valeur ajoutée nette et de 17 500 emplois. La méthode suivie pour évaluer l'impact économique du déploiement de l'éolien depuis dix ans peut être utilisée pour se projeter à 2030. La principale différence repose sur le coût futur de l'éolien, en baisse, et sur le type de substitution. En effet, d'ici 2030, une partie non-négligeable de l'électricité produite en plus sera de la création nette quand une partie se substituera au gaz et une autre à la consommation directe d'essence et de fioul (en plus des classiques nucléaire et électricité à base de fioul et de charbon comme pour la période 2012 – 2021). Dans le détail, le développement futur de la filière éolienne devrait créer 472 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte nette pour l'économie française en 2030. Ces effets directs et indirects devraient eux-mêmes entraîner la création de 599 M€ de valeur ajoutée supplémentaire *via* les effets d'entraînement. La croissance de la filière éolienne devrait ainsi permettre de créer presque 9 900 emplois directs et indirects et plus de 7 500 emplois supplémentaires par effet d'entraînement entre 2021 et 2030, soit approximativement 17 500 emplois au total.

SOMMAIRE

1. SUBSTITUTION : L'ÉOLIEN REMPLACE DU NUCLÉAIRE ET DES ÉNERGIES FOSSILES	6
1.1. Méthode : calculer des taux de substitution.....	7
1.2. Eolien terrestre : une hausse considérable en dix ans.....	9
1.3. Substitution : une baisse de nucléaire, de fioul puis de charbon	10
2. VALEUR AJOUTÉE DIRECTE ET INDIRECTE EN FRANCE : ÉVALUATION POUR L'ÉOLIEN, LE NUCLÉAIRE, LE CHARBON ET LE FIOUL	13
2.1. Méthode : calculer la valeur qui reste en France pour chaque énergie.....	14
2.2. La filière éolienne : une création brute de valeur de 889M€.....	17
2.3. La substitution au nucléaire : une perte de 233 M€ de valeur ajoutée	19
2.4. La substitution au charbon : une perte d'emplois marquée	21
2.5. La substitution au fioul : une perte de 22M€ de valeur ajoutée.....	23
3. RÉSULTATS : UNE CRÉATION NETTE DE 1,1 MD€ DE VALEUR POUR LA FILIÈRE ÉOLIENNE	26
3.1. Effets directs et indirects : 570 M€ en 2021 Et 10 700 emplois en dix ans.....	27
3.2. Effets d'entraînement sur l'économie : 568 M€ et 7 200 emplois supplémentaires	28
3.3. Effets totaux : 1,1 MD€ de valeur ajoutée en 2021 et 17 900 emplois en dix ans	29
4. PROSPECTIVE : UNE CRÉATION NETTE DE 1,1 MD€ À HORIZON 2030 POUR L'ÉOLIEN	30
4.1. Substitution : à horizon 2030, l'éolien terrestre remplacera aussi du gaz, du diesel et de l'essence	31
4.2. Valeur directe et indirecte en France : évaluation pour l'éolien en 2030, le gaz, l'essence et le diesel	35
4.3. Résultats : 1,1 Md€ de valeur ajoutée et plus de 17 500 emplois supplémentaires en 2030.	38
5. ANNEXES	40

1. SUBSTITUTION : L'ÉOLIEN REMPLACE DU NUCLÉAIRE ET DES ÉNERGIES FOSSILES



La production éolienne a doublé entre 2012 et 2021, passant de 14,8 TWh à 37,9 TWh. Afin d'évaluer l'impact économique de cette progression, il convient de prendre en compte les sources d'énergies auxquelles l'éolien s'est substitué, à savoir le nucléaire, le charbon et le fioul. Les effets économiques différant selon que la baisse repose sur des fermetures de centrales ou des baisses de production sans fermeture, les deux opérations sont distinguées. Dans le détail, 63% de la nouvelle production des éoliennes s'est substituée au nucléaire, dont 23% à la fermeture de Fessenheim et 40% aux autres centrales qui ont vu leur facteur de charge baisser. Ensuite, 27% de la nouvelle production éolienne s'est substituée aux centrales à charbon fermées. Enfin, 10% de la nouvelle production éolienne s'est substituée au fioul, dont 9% aux centrales fermées et 1% aux centrales qui ont vu leur facteur de charge baisser.

1.1. MÉTHODE : CALCULER DES TAUX DE SUBSTITUTION

1.1.1 EVALUER UN IMPACT NET : L'ÉOLIEN DOIT ÊTRE COMPARÉ AUX ÉNERGIES AUXQUELLES IL SE SUBSTITUE

Dans un premier temps, il convient d'identifier les énergies auxquelles la production supplémentaire des éoliennes s'est substituée. La hausse de la production éolienne a deux effets antagoniques : d'un côté, le développement de la filière est source d'emplois et de valeur ajoutée ; de l'autre, cela entraîne par effet de substitution une diminution de la valeur créée par les énergies qui voient leur production décliner. Afin d'estimer l'impact net du développement de la filière éolienne sur la période 2012 – 2021, ces deux effets doivent être pris en compte. Il est donc indispensable d'identifier les sources d'énergies auxquelles l'éolien s'est substitué.

Concernant les baisses de production des énergies substituées, il convient de distinguer les cas où la production éolienne se substitue à des fermetures de centrales et ceux où elle se substitue à une baisse du facteur de charge de centrales toujours en activité. L'impact économique de la fermeture définitive d'une centrale n'est pas le même que celui de la diminution de son facteur de charge¹. Ces deux cas de figure doivent donc être distingués.

1.1.2 DÉTAILS DES CALCULS : TROIS ÉTAPES

L'objectif est, pour chaque MWh supplémentaire d'éolien, de déterminer s'il s'est substitué ou non à une autre source d'énergie et le cas échéant, laquelle. Les calculs sont effectués à partir des données issues des bilans électriques de RTE de 2012 à 2021². L'objectif de la présente étude étant

¹ Le facteur de charge se définit comme le rapport entre la production effective pendant une période donnée et l'énergie qui aurait été produite pendant la même période si l'installation avait été exploitée en continu à pleine puissance

² « Bilan électrique 2020 » (RTE, 2021), https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf.

d'évaluer l'impact structurel de l'éolien, Asterès a fait le choix de gommer les variations conjoncturelles de la production d'électricité (voir encadré).

Pour ce faire, Asterès détermine le montant de la variation de la production de chaque énergie sur la période 2012 – 2021, puis une répartition de la baisse entre fermeture et facteur de charge et enfin évalue un taux de substitution. La comparaison, pour les énergies substituées, entre l'évolution de la puissance installée et l'évolution de la production permet de répartir la baisse de production entre les fermetures de centrales et la diminution du facteur de charge. Le ratio de la variation de la puissance installée sur la variation de la production permet de déterminer la part de la baisse de production imputable à la fermeture de centrales. Le reste est imputé à la diminution de la durée de fonctionnement des centrales existantes. Enfin, un taux de substitution est évalué à partir des données de RTE en répartissant les baisses de production de manière uniforme entre l'éolien et les autres sources d'énergie en développement³.

POURQUOI LISSER LES VARIATIONS CONJONCTURELLES DE LA PRODUCTION

La production d'électricité s'est maintenue à un niveau stable entre 2012 et 2019, malgré quelques variations conjoncturelles. Sur cette période, la production d'électricité a oscillé entre 529 TWh et 550 TWh, sans qu'aucune tendance de fond ne semble se dégager (cf. annexe 1). Cette stabilité s'explique par les gains d'efficacité énergétique qui ont permis de maintenir les besoins en électricité au même niveau : la consommation d'électricité a oscillé entre 471 TWh et 481 TWh sur la période (cf. annexe 2).

Le confinement a interrompu une décennie de stabilité de la consommation et de la production d'électricité. La consommation corrigée des aléas climatiques a baissé de 3,5% en 2020 par rapport à l'année précédente, pour atteindre 460 TWh. Selon RTE, cette baisse significative est due à la crise sanitaire. De même, la production d'électricité a diminué de 7% en 2020, atteignant son point le plus bas depuis 1998, soit 500,1 TWh.

Le confinement a également affecté le mix de la production d'électricité en France. La production nucléaire a diminué de 11,6% en 2020 par rapport à 2019. Selon RTE, plus des trois quarts de cette baisse est imputable à la crise sanitaire. En ralentissant les travaux de maintenance des centrales nucléaires, la crise sanitaire a accru l'indisponibilité moyenne du parc nucléaire français. Celle-ci est passée de 18,8 GW en 2019 à 22,3 GW en 2020. En conséquence, le mix a évolué en faveur des EnR. La part du nucléaire dans le mix énergétique est passée de 70,6% de la production à 67,1%, tandis que celle de l'éolien est passée de 6,3% à 7,9%.

L'étude portant sur l'évolution structurelle du mix énergétique, Asterès a fait le choix de lisser les variations conjoncturelles de la production d'électricité et de gommer les effets de la crise sanitaire. Les données utilisées dans cette étude (hors partie prospective) ont ainsi été calculées en appliquant les mix énergétiques de 2012 et 2021 à la moyenne de la production sur la période 2012 – 2021 hors année 2020, soit 539 TWh.

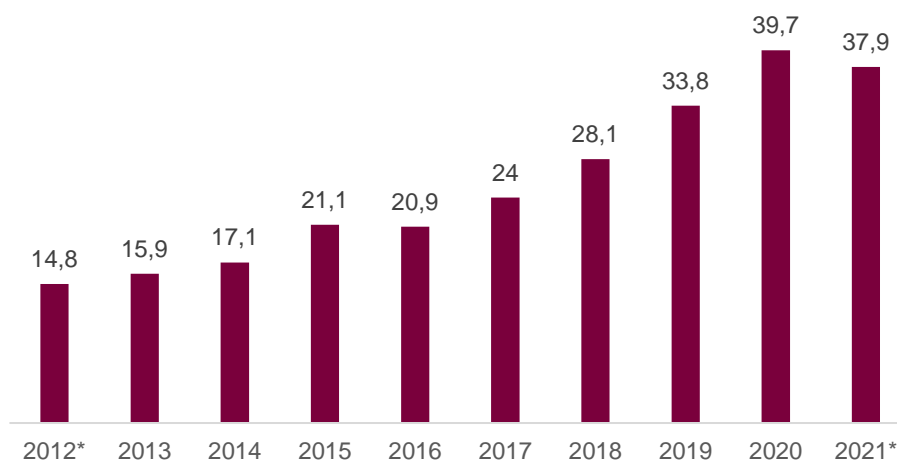
³ Dans le détail, la formule du taux de substitution peut être exprimée de la manière suivante : $|\Delta PF_{déclin}| / \Sigma \Delta PF_{développement}$; avec ΔP = Variation de la production sur la période ; $F_{déclin}$ = Filière dont la production diminue sur la période ; $F_{développement}$ = Filières dont la production augmente sur la période. Le signe sigma (Σ) indique que les nouvelles productions des filières en développement sont additionnées

1.2. EOLIEN TERRESTRE : UNE HAUSSE CONSIDÉRABLE EN DIX ANS

1.2.1. PRODUCTION : L'ÉLECTRICITÉ D'ORIGINE ÉOLIENNE A PLUS QUE DOUBLÉ

La production éolienne a augmenté de 23,1 TWh en dix ans. À production d'électricité totale constante⁴, la part de l'éolien a doublé entre 2012 à 2021, passant de 2,8% à 7,0%. La production de la filière éolienne est ainsi passée de 14,8 TWh en 2012 à 37,9 TWh en 2021.

Graphique 1 : Évolution de la production d'électricité d'origine éolienne entre 2012 et 2021 (en TWh)



Source : RTE, calculs Asterès

Note : Les données pour les années 2012 et 2021 ont été corrigées des variations conjoncturelles et notamment de l'« effet covid » (voir encadré dans la partie 1.1.2).

1.2.2. PUISSANCE INSTALLÉE : LE PARC ÉOLIEN A PLUS QUE QUADRUPLÉ

Le parc éolien a progressé de 15 GW en dix ans. La part de l'éolien dans le parc total de production d'électricité a plus que quadruplé entre 2012 et 2021, passant de 3% à 14% du parc. En 2016, la puissance installée du parc éolien a dépassé celle du gaz (11,8 GW contre 11,7 GW), devenant le troisième parc derrière le nucléaire et l'hydraulique. À la fin de l'année 2021, la puissance éolienne totale raccordée en France atteignait presque 19 GW. La progression de l'éolien a été plus rapide que celle du solaire, qui est passé de 6% à 9% du parc de production électrique sur la période 2012 – 2021.

⁴ Les chiffres ont été corrigés des variations conjoncturelles par Asterès (voir encadré en p. 9).

Tableau 1 : Évolution de la puissance installée du parc de production électrique (en MW)

	2012	% du parc total	2021	% du parc total
Parc fioul	9 386	7%	3 380	2%
Parc charbon	7 914	6%	1 818	1%
Parc gaz	10 527	8%	12 781	9%
Parc hydraulique	25 407	20%	25 700	18%
Parc nucléaire	63 130	49%	61 370	44%
Parc solaire	7 536	6%	13 067	9%
Parc éolien	3 727	3%	18 783	14%
Parc bioénergie	1 346	1%	2 214	2%
Total	128 972	100%	139 112	100%

Source : RTE, calculs Asterès

1.3. SUBSTITUTION : UNE BAISSÉ DE NUCLÉAIRE, DE FIOUL PUIS DE CHARBON

1.3.1. PARTS DANS LE MIX ÉNERGÉTIQUE : LE CHARBON ET LE FIOUL DEVIENNENT MARGINAUX, LE NUCLÉAIRE RECULE

Alors que l'éolien a gagné du terrain, le nucléaire et les énergies fossiles (hors gaz) ont décliné. À production d'électricité totale constante, la part du charbon dans le mix énergétique est passée de 3,2% en 2012 à 0,7% en 2021 et la part du fioul de 1,2% à 0,4%. La production de la filière charbon est ainsi passée de 17,3 TWh à 3,9 TWh entre 2012 et 2021 et celle de la filière fioul de 6,7 TWh à 2,0 TWh, reflétant la volonté des pouvoirs publics de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à la production d'électricité. Les centrales à fioul ou à charbon restantes ont pour unique but de garantir la sécurité énergétique du pays pendant les pics de consommation. Sur la fin de l'année 2021, la production de la filière charbon a été plus importante qu'anticipé en raison de l'envolée du prix du gaz. Quant au nucléaire, sa part est passée de 75% de la production d'électricité en 2012 à 70% en 2021. La production d'électricité d'origine nucléaire est ainsi passée de 402,8 TWh en 2012 à 371,8 TWh en 2021.

Tableau 2 : Production d'électricité par filière en 2012 et 2021 (avec lissage des variations conjoncturelles)

	Mix énergétique en 2012	Production en TWh	Mix énergétique en 2021	Production en TWh
Fioul	1%	6,7	0%	2,0
Charbon	3%	17,3	1%	3,9
Gaz	4%	23,9	6%	33,9
Hydraulique	12%	63,5	12%	64,4
Nucléaire	75%	402,8	69%	371,8
Eolienne	3%	14,8	7%	37,9
Solaire	1%	4,1	3%	14,7
Bioénergie	1%	5,8	2%	10,3
Total	100%	539	100%	539

Source : RTE, calculs Asterès

Note : Les mix énergétiques de 2012 et 2021 ont été appliqués à la production moyenne d'électricité sur la période (539 TWh) afin d'en déduire la production par filière. Pour les données brutes avant lissage des variations conjoncturelles voir annexe 3.

13.2. TAUX DE SUBSTITUTION DE L'ÉOLIEN : EN MAJORITÉ AUX DÉPENS DU NUCLÉAIRE, PUIS DU CHARBON ET ENFIN DU FIOUL

La production totale d'électricité s'étant maintenue à un niveau stable sur la période, l'éolien s'est entièrement substitué au fioul, au charbon et au nucléaire. À partir des données du tableau 4, Asterès a calculé qu'en moyenne, la production nouvelle de la filière éolienne entre 2012 et 2021 s'est substituée à 63% à du nucléaire, à 27% à du charbon et à 10% à du fioul.

Tableau 3 : Taux de substitution de la nouvelle production d'énergie

	Part substituée...
Au fioul	10%
Au charbon	27%
Au nucléaire	63%

Source : RTE, calculs Asterès

13.3. LE TYPE DE SUBSTITUTION : EN GRANDE MAJORITÉ DES FERMETURES DE CENTRALES

La substitution de l'éolien aux autres sources d'électricité a principalement reposé sur des fermetures de centrales pour le fioul et le charbon, et en majorité sur des diminutions de facteur de chargé (liées à la maintenance) pour le nucléaire. Chaque type de substitution sera chiffré différemment pour évaluer l'impact économique net de l'éolien en France.

- Pour le nucléaire, la majorité de la baisse de production résulte de la diminution du facteur de charge. Dans le détail, la baisse de du facteur de charge explique 64% de la baisse de production et la fermeture de Fessenheim, 36%. La diminution du facteur de charge s'explique par l'augmentation de l'indisponibilité des centrales nucléaires, en raison

d'opérations de maintenance qui impliquent une fermeture temporaire mais complète de tranches nucléaires pour une période de 35 à 100 jours.

- **Pour le fioul, l'essentiel de la baisse de production s'explique par la fermeture de centrales.** Dans le détail, la fermeture de centrales explique 90% de la baisse de production et la diminution du facteur de charge des centrales restantes 10% de la baisse de production.
- **Pour le charbon, la totalité de la baisse de production d'électricité est imputable à la fermeture de centrales.** Le facteur de charge des centrales à charbon n'a pas varié.

Tableau 4 : Répartition de la substitution entre les deux modes

	Fermetures de centrales	Baisse du facteur de charge
Au fioul	9%	1%
Au charbon	27%	0%
Au nucléaire	23%	40%

Source : RTE, calculs Asterès

2. VALEUR AJOUTÉE
DIRECTE ET INDIRECTE
EN FRANCE :
ÉVALUATION POUR
L'ÉOLIEN, LE NUCLÉAIRE,
LE CHARBON ET LE FIOUL



L'estimation de la valeur ajoutée directe et indirecte logée en France distingue trois cas de figure : l'installation d'éoliennes, la fermeture de centrales existantes et la baisse de charge de certaines qui restent ouvertes. Pour chaque source d'énergie électrique concernée (éolienne, nucléaire, charbon, fioul), des études existantes et des données publiques permettent d'évaluer la part de valeur ajoutée directe et indirecte en France rapportée à l'investissement, au coût total d'exploitation ou aux coûts variables. Pour l'éolien, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France s'élève à 36% pour la phase d'investissement et 66% pour la phase d'exploitation. Pour le nucléaire, la valeur ajoutée directe et indirecte représente 84% des coûts d'exploitation, utilisés comme référence pour les fermetures de centrales, et 67% des coûts variables, utilisés comme référence pour les baisses de facteur de charge. Pour le charbon ces mêmes indicateurs sont à 60% et 14% et pour le fioul à 60% et 9%. Ces taux de valeur ajoutée permettent d'évaluer un montant de valeur créée ou détruite en France et un nombre d'emplois créés ou perdus en France pour chaque énergie.

2.1. MÉTHODE : CALCULER LA VALEUR QUI RESTE EN FRANCE POUR CHAQUE ÉNERGIE

2.1.1. VALEUR AJOUTÉE DIRECTE ET INDIRECTE : ESTIMER UN RATIO POUR LES COÛTS D'EXPLOITATION ET UN RATIO POUR LES COÛTS VARIABLES

L'estimation de la valeur logée en France selon l'énergie productrice d'électricité doit distinguer trois cas de figure : l'expansion du parc, la fermeture définitive d'une centrale et la diminution de son facteur de charge. Ces trois cas de figure ont des impacts économiques différents :

- **Afin d'évaluer la valeur ajoutée créée par le développement de la filière éolienne, il est nécessaire de prendre en compte la valeur ajoutée créée au moment de l'installation des nouvelles éoliennes (la phase d'investissement) et la valeur ajoutée créée lors de l'utilisation du parc (la phase d'exploitation).** Les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation sont fixes, donc exprimés en €/MW/an. Dans cette étude, ils seront rapportés à la production annuelle pour donner un chiffre en €/MWh.
- **Afin d'évaluer la valeur ajoutée perdue lors de la fermeture définitive d'une centrale, il convient de prendre en compte uniquement la valeur ajoutée de la phase d'exploitation.** L'objectif de cette étude n'est pas de choisir entre plusieurs sources d'énergie, mais de comparer les gains liés à l'installation de nouvelles éoliennes aux pertes liées à l'arrêt de centrales déjà installées. L'arrêt de centrales thermiques ou nucléaire ne détruira pas de valeur sur la phase d'investissement puisque cette phase est déjà passée. Seule l'exploitation de ces centrales continue de créer de la valeur. Ce sont donc les coûts totaux d'exploitation qui doivent être pris en compte. Ces coûts comprennent les coûts fixes d'exploitation, exprimés en €/MW/an, et les coûts variables d'exploitation, exprimés en €/MWh. Les coûts fixes

d'exploitation seront rapportés à la production annuelle puis ajoutés aux coûts variables, pour donner un total en €/MWh.

- **Afin d'évaluer la valeur ajoutée perdue lors de la baisse de charge d'une centrale existante, il convient de prendre en compte uniquement les coûts d'exploitation variables.** Si une centrale diminue sa production sans fermer totalement, seuls les coûts d'exploitation variables baisseront. Les coûts fixes d'exploitation, par définition, resteront inchangés. Les coûts d'exploitation variables sont composés du coût du combustible et des coûts d'exploitation hors combustible qui varient avec la production. Ces coûts sont systématiquement exprimés en €/MWh.

2.1.2. SOURCES ET DONNÉES : DES RAPPORTS PUBLICS POUR CHAQUE SOURCE D'ÉNERGIE

Les données sur les coûts, la valeur ajoutée et l'emploi doivent être collectées. Ces données proviennent dans la majorité des cas de sources publiques nationales. Pour les énergies thermiques, les données nationales sont complétées par des données internationales provenant de banques privées ou d'instituts de recherche.

- **Pour la filière éolienne, les données de référence proviennent de l'ADEME, du Syndicat de Energies Renouvelables et de la Cour des comptes.** Pour les coûts d'investissement, la Cour des comptes a publié en 2018 un rapport sur « le soutien aux énergies renouvelables » qui fournit des données sur le montant des investissements dans l'éolien⁵. Pour les coûts d'exploitation, les données proviennent de l'étude de l'ADEME sur « les coûts des énergies renouvelables et de récupération »⁶ publiée en 2020. Le taux de valeur ajoutée directe et indirecte est ensuite calculé à partir des données du Syndicat des énergies renouvelables (SER) sur la valeur ajoutée directe et indirecte logée en France en 2019⁷. Enfin, pour l'emploi, Asterès s'appuie sur deux études de l'ADEME : la première, « Étude sur la filière éolienne française »⁸, publiée en 2017 détaille l'impact de la filière sur l'emploi ; la seconde est une étude sur l'impact socio-économique de la transition énergétique publiée en 2021⁹.
- **Pour la filière nucléaire, les études de référence sont celles de PwC, de la Cour des comptes, de la banque Lazard, de l'Insee et de la Sfen.** Les données sur le coût d'exploitation des centrales nucléaires proviennent d'un rapport de la Cour des comptes datant de 2014¹⁰. La part variable hors combustible est déterminée à partir des données américaines de la banque

⁵ Xavier Lafon et al., « Le soutien aux énergies renouvelables » (Cour des comptes, mars 2018), <https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2018-04/20180418-rapport-soutien-energies-renouvelables.pdf>.

⁶ Laurence Haeusler et al., « Coûts des énergies renouvelables et de récupération » (20, avenue du Grésillé 49004 Angers Cedex 01: ADEME, janvier 2020), <https://librairie.ademe.fr/cadic/767/couts-energies-renouvelables-et-recuperation-donnees-2019-010895.pdf>.

⁷ SER, « Évaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires » (Syndicat des énergies nouvelles, EY, juin 2020), https://www.syndicat-energies-renouvelables.fr/wp-content/uploads/basedoc/evaluationeconomiqueenr_rapport_12062020-vf.pdf.

⁸ ADEME et al., « Etude sur la filière éolienne française : bilan, perspective et stratégie » (ADEME, 2017), https://eolise.fr/media/filer_public/ff/cd/ffcdbc95-557d-4abb-badb-0c0c71278f9a/201709_-_ademe_-_etude_sur_la_filiere_eolienne_francaise_bilan_prospective_strategie.pdf.

⁹ ADEME et In Numeri, « Marchés & emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération » (Ademe, In Numeri, juillet 2021), <https://librairie.ademe.fr/cadic/3889/rapport-marches-emplois-enr--2019.pdf>.

¹⁰ « Le coût de production de l'électricité nucléaire actualisation 2014 ».

Lazard (2020)¹¹. Le taux de valeur ajoutée directe et indirecte est calculé à partir des données de l'étude de PwC, publiée en 2011 et portant sur des données de 2009, qui vise à estimer l'impact socio-économique de la filière nucléaire en France. En ce qui concerne l'emploi, les données proviennent d'une étude d'impact réalisée par l'Insee sur la centrale Fessenheim datant de 2014¹² et d'une étude synthèse de la Sfen sur l'emploi dans le nucléaire publiée en 2017¹³.

Enfin, pour les énergies thermiques, Asterès s'appuie à la fois sur des données internationales, des données publiques et des études privées. En raison de l'absence de données spécifiques au cas français, les données sur le coût d'exploitation des centrales thermiques s'appuient principalement sur l'étude de la banque Lazard publiée en 2020¹⁴, portant sur les centrales américaines, et une méta-étude réalisée en 2013 par le German Institute of Economic Research¹⁵. Enfin, les données sur le prix des combustibles proviennent du Commissariat Général du Développement durable (CGEDD) qui publie chaque année le bilan énergétique de la France¹⁶. La valeur ajoutée sera ensuite estimée à partir des tableaux entrée – sortie de l'Insee, en appliquant le taux moyen du secteur de la production et distribution d'électricité. Pour les emplois dans la filière charbon, le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire (MTES) fournit des données précises pour chaque centrale encore en activité¹⁷. Les données sur la filière fioul pourront ensuite être déduites d'un rapport de PwC datant de 2020 et portant sur l'ensemble de la filière électrique¹⁸.

¹¹ Lazard, « Lazard's levelized cost of energy analysis » (Banque Lazard, octobre 2020), <https://www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>.

¹² Clément Gass et Sylvain Moreau, « Une inscription territoriale diffuse pour la centrale nucléaire de Fessenheim - Insee Analyses Alsace - 2 », Insee, consulté le 8 décembre 2021, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1285707>.

¹³ « Calcul des emplois de la filière nucléaire par région », Note méthodologique (Sfen, juin 2017), https://www.sfen.org/sites/default/files/public/atoms/files/calcul_des_emplois_de_la_filiere_nucleaire_par_region_-_note_methodologique.pdf.

¹⁴ Lazard, « Lazard's levelized cost of energy analysis ».

¹⁵ Andreas Schröder et al., « Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050 », Data Documentation (DIW Berlin, German Institute for Economic Research, 2013), <https://econpapers.repec.org/paper/diwdiwddc/dd68.htm>.

¹⁶ Commissariat général du développement durable, « Bilan énergétique de la France pour 2019 », Bilan énergétique de la France pour 2019, consulté le 22 décembre 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2019/>.

¹⁷ « Fermeture des centrales à charbon d'ici 2022 », Dossier de Presse (Ministère de la Transition écologique et solidaire, janvier 2020), https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP_Fermeture%20des%20centrales%20a%20charbon%20d%27ici%202022%20-%20Enjeux%20et%20projets%20de%20territoire.pdf.

¹⁸ PwC, « Etude prospective : emplois et compétences de la filière électrique », 2020, <https://www.fieec.fr/wp-content/uploads/2020/10/EDEC-Filiere-electrique-Rapport-vf.pdf>.

2.2. LA FILIÈRE ÉOLIENNE : UNE CRÉATION BRUTE DE VALEUR DE 889M€

2.2.1. COÛT DE PRODUCTION : LE POIDS DE LA PHASE D'INVESTISSEMENT

Les coûts totaux de production de l'éolien s'élèvent à 89€/MWh en 2021. Ce chiffre prend en compte les deux composantes du coût de production des éoliennes, c'est-à-dire, le coût d'installation des éoliennes et le coût d'exploitation du parc.

- **Le coût d'investissement de l'éolien s'élève à 66€/MWh en 2021.** Selon le Commissariat général au développement durable (CGEDD), le montant des investissements dans l'éolien terrestre s'élevait à 2,5 Mds€ en 2018¹⁹. En l'absence de données plus récentes et en prenant en compte que les investissements se sont maintenus à un niveau relativement stable entre 2016 et 2018, Asterès considère que le volume des investissements en 2021 est similaire à celui de 2018.
- **Le coût d'exploitation du parc éolien s'élève à 23€/MWh en 2021.** Ce chiffre a été obtenu sur la base d'un coût annuel d'exploitation du parc éolien de 46 000€/MW²⁰.

2.2.2. VALEUR AJOUTÉE : UNE PART RESTANT EN FRANCE PLUS ÉLEVÉE POUR LA PHASE D'EXPLOITATION QUE LA PHASE D'INVESTISSEMENT

La phase d'investissement est particulièrement dépendante des importations, contrairement à la phase d'exploitation. Les données brutes sur la valeur ajoutée directe et indirecte en France sont données par le SER. Le ratio est ensuite déduit à partir des coûts calculés dans la partie précédente.

- **Sur la phase d'investissement, la part de la valeur ajoutée directe et indirecte en France est de 36% du montant total des investissements²¹.** Les entreprises françaises sont bien positionnées sur les phases de développement, installation et raccordement, où les importations sont faibles (entre 5% et 7%)²². En revanche, les composants des turbines, qui comptent pour 70% des investissements, sont en majorité importés.

¹⁹ Commissariat général du développement durable, « Dépenses d'investissement dans les énergies renouvelables | Chiffres clés des énergies renouvelables », Chiffres clés des énergies renouvelables - Édition 2021, consulté le 22 décembre 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2021/5-depenses-dinvestissement-dans-les-energies-renouvelables.php>.

²⁰ Hypothèse retenue par le SER. « Évaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires », p. 52.

⁸ Sur la base d'une valeur ajoutée de 890M€ (SER) et d'un montant des investissements s'élevant à 2,5Mds€ (CGEDD)

²² SER, « Évaluation et analyse de la contribution des énergies renouvelables à l'économie de la France et de ses territoires », p. 52

- **Pour la partie exploitation, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte s’élève à 66%²³.** Contrairement, à la phase de fabrication des turbines, le recours aux importations est très faible durant la phase d’exploitation et de maintenance (5%).

2.2.3. EMPLOI : UN RATIO PAR VALEUR AJOUTÉE PLUTÔT ÉLEVÉ

Chaque million d’euro de valeur ajoutée génère en moyenne 18 emplois directs et indirects. En valeur absolue, la filière éolienne représente environ 26 500 emplois en 2021.

- **Le nombre d’emplois directs s’élève à 16 186 ETP.** D’après les estimations de l’ADEME, la filière éolienne générerait 14 140 emplois directs en 2019²⁴, soit un ratio de 0,9 emploi/MW. En maintenant ce ratio constant dans le temps, le nombre d’emplois directs est estimé à 16 186 ETP en 2021. La majorité des emplois directs est liée aux phases d’étude et de développement (30%) et de fabrication et construction (42%). Le reste est lié à la maintenance et l’exploitation (22%) et au raccordement (6%).
- **Le nombre d’emplois indirects est estimé à 10 286 ETP.** Selon une étude antérieure de l’ADEME (2017), le ratio emploi indirect sur emploi direct est de 64%²⁵. Nous estimons donc le nombre d’emplois indirects liés à la filière éolienne en 2021 à 10 286 ETP. La répartition des emplois par maillon de la chaîne de valeur est légèrement différente pour les emplois indirects, avec un poids plus important de la phase de fabrication (42% v. 32%) et une moindre contribution de la phase d’études et développement (18% v. 30%).

Tableau 5 : Emplois dans la filière éolienne en 2021

	Emplois directs	Emplois indirects	Total emplois	Emplois par M€ de valeur ajoutée
Etudes et développement	4 856	1 852	6 707	
Fabrication	5 179	4 423	9 603	
Génie civil	1 619	1 440	3 059	
Raccordement	971	720	1 691	
Exploitation et maintenance	3 561	1 852	5 412	
Total	16 186	10 286	26 472	18

Source : ADEME 2021 et 2017, calculs Asterès

2.2.4. BILAN : 889 M€ DE VALEUR AJOUTÉE ET PLUS DE 16 000 EMPLOIS BRUTS

Sans prendre en compte les effets de substitution, la croissance de la filière éolienne a permis de créer 889 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte en 2021 et plus de 16 000 emplois sur la période 2012 - 2021. La phase d’investissement a davantage contribué à cette création de valeur. Les

²³ La valeur ajoutée liée à l’exploitation s’élève à 500M€ en 2019 selon le SER, pour un coût d’exploitation de 760M€ la même année (sur la base de 24€ du MWh).

²⁴ ADEME et In Numeri, « Marchés & emplois concourant à la transition énergétique dans le secteur des énergies renouvelables et de récupération ».

²⁵ ADEME et al., « Etude sur la filière éolienne française : bilan, perspective et stratégie ».

investissements dans l'éolien ont engendré une valeur ajoutée de 672 M€ et la maintenance et l'exploitation des nouvelles éoliennes une valeur ajoutée de 216 M€.

Tableau 6 : Impact économique brut de l'éolien en 2021

	Variation de la production en MWh	Impact sur la VA (en €)	Impact sur l'emploi
Eolien	23 097 805	888 643 340	16 126

Sources : RTE (2022), Cour des comptes (2018), Ademe (2020), SER (2020)

2.3. LA SUBSTITUTION AU NUCLÉAIRE : UNE PERTE DE 233 M€ DE VALEUR AJOUTÉE

2.3.1. COÛT D'EXPLOITATION : PLUS ÉLEVÉ POUR LES CENTRALES NUCLÉAIRES QUE POUR LE PARC ÉOLIEN

Le coût total d'exploitation des centrales nucléaires s'élève à 40€ du MWh en 2021. Ce coût, calculé à partir des données de la Cour des comptes, englobe les dépenses générales d'exploitation, l'achat du combustible, les investissements de maintenance sur le parc existant et les provisions pour la gestion des déchets et du combustible usé²⁶.

Une part de ce coût total d'exploitation est constituée du coût variable d'exploitation des centrales nucléaires, qui s'élève à 10€ du MWh en 2021. Ce coût comprend la part variable des dépenses d'exploitation hors combustible de 4€/MWh²⁷ et les 6€/MWh d'achat de combustible²⁸.

2.3.2. VALEUR AJOUTÉE : UNE PART SIGNIFICATIVE SUR LE TERRITOIRE NATIONAL

La valeur ajoutée directe et indirecte en France représente 84% du coût total d'exploitation des centrales nucléaires. Selon les données de PwC, la valeur ajoutée directe et indirecte créée par

²⁶ Le calcul a été effectué sur la base d'un coût d'exploitation total de 241 108€/MW (cf. annexe 4 pour le détail des dépenses), soit 39€ du MWh en 2021.

²⁷ Selon les données de la banque Lazard, le coût variable d'exploitation hors combustible des centrales nucléaires s'élève à 3,7 € du MWh aux Etats-Unis.

²⁸ « Le coût de production de l'électricité nucléaire actualisation 2014 », p. 14.

l'exploitation des centrales nucléaires en France s'élève à 12,7 Mds€²⁹, pour un coût total d'exploitation de 15,2 Mds€³⁰.

La valeur ajoutée directe et indirecte en France découlant des activités engendrées par les coûts d'exploitation variables est de 67%³¹. Les mines d'uranium ne sont pas localisées en France, contrairement aux activités liées à sa transformation. Selon la Sfen, la transformation de l'uranium naturel correspond aux deux tiers des dépenses de combustible³².

2.3.3. EMPLOI : LES BAISSÉS DE CHARGE ONT UN IMPACT PLUS FORT QUE LA FERMETURE DE FESSENHEIM

La fermeture de la centrale de Fessenheim devrait entraîner la perte de 4 emplois directs et indirects par million d'euro de valeur ajoutée. Selon l'Insee, la centrale de Fessenheim employait en moyenne 850 salariés et ses commandes généraient 510 emplois indirects supplémentaires³³, pour une production annuelle moyenne de 10,3 TWh³⁴.

Les baisses de charge des autres centrales devraient entraîner la perte de 17 emplois directs et indirects par million d'euro de valeur ajoutée. Plusieurs estimations du nombre d'emplois liés à la filière nucléaire ont été réalisées. Dans une note méthodologique, la Société française d'énergie nucléaire (Sfen) propose une synthèse des rapports existants et estime à plus de 211 000 le nombre d'emplois liés directement ou indirectement à la filière nucléaire (dont plus de 111 000 emplois directs)³⁵.

Tableau 7 : Emplois dans la filière nucléaire (en €)

	Emplois directs	Emplois indirects	Total	Emplois par M€ de valeur ajoutée
Filière nucléaire	111 149	99 851	211 003	17
Centrale de Fessenheim	850	510	1 360	4

Source : Sfen (2017), Insee (2014), calculs Asterès

²⁹ D'après les données de PwC (2011), en prenant en compte l'amont du cycle et la partie exploitation et maintenance.

³⁰ Calcul effectué sur la base d'un coût d'exploitation de 240 108€/MW et d'une puissance installée de 63 130MW.

³¹ Cf. annexe 5 pour les détails du calcul.

³² « L'uranium, une ressource naturelle », Sfen (blog), 3 octobre 2020, <https://www.sfen.org/energie-nucleaire/panorama-nucleaire/uranium-monde>.

³³ Gass et Moreau, « Une inscription territoriale diffuse pour la centrale nucléaire de Fessenheim - Insee Analyses Alsace - 2 ».

³⁴ « PRIS - Reactor Details FESSENHEIM-1 », International Atomic Energy Agency, consulté le 20 décembre 2021, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=163>; « PRIS - Reactor Details FESSENHEIM-2 », International Atomic Energy Agency, consulté le 20 décembre 2021, <https://pris.iaea.org/PRIS/CountryStatistics/ReactorDetails.aspx?current=164>.

³⁵ « Calcul des emplois de la filière nucléaire par région ».

2.3.4. BILAN : 233 M€ DE VALEUR AJOUTÉE BRUTE ET 1 700 EMPLOIS PERDUS AVEC LA SUBSTITUTION

La progression de l'éolien a entraîné la perte de 233 M€ de valeur ajoutée dans le nucléaire en 2021 et presque 1 700 emplois entre 2012 et 2021. Dans le détail, le développement de la filière éolienne pour compenser la fermeture de centrales nucléaires a entraîné en 2021 la perte de 175 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte ainsi que 697 emplois. La substitution de l'éolien à la baisse de charge des centrales nucléaires a entraîné la perte de 58 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte et presque 1 000 emplois.

Tableau 8 : Valeur et emplois perdus dans le nucléaire

	MWh substitués	Impact sur la valeur ajoutée directe et indirecte (en €)	Impact sur l'emploi
Nucléaire	-14 563 361	-233 039 177	-1 693
Dont fermeture de centrale	-5 265 786	-174 796 960	-697
Dont baisse de charge	-9 297 574	-58 242 217	-996

Sources : RTE (2022), Insee (2014), PwC (2011), Cour des comptes (2014), Lazard (2020)

2.4. LA SUBSTITUTION AU CHARBON : UNE PERTE D'EMPLOIS MARQUÉE

2.4.1. COÛT D'EXPLOITATION : ENTRE L'ÉOLIEN ET LE NUCLÉAIRE

Le coût total d'exploitation des centrales à charbon s'élève à 28€/MWh en 2021. Ce coût se compose d'une part fixe et d'une part variable :

- **Le coût fixe d'exploitation des centrales à charbon s'élève à 14€/MWh en 2021.** Ce coût au MWh a été calculé sur la base d'un coût d'exploitation fixe de 30 000€/MW/an³⁶.
- **Le coût variable d'exploitation des centrales à charbon s'élève à 14€/MWh en 2021.** Ce coût comprend le coût variable d'exploitation hors combustible de 3€/MWh selon la banque Lazard³⁷ et le coût du combustible de 11€/MWh³⁸.

³⁶ Schröder et al., « Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050 ».

³⁷ Lazard, « Lazard's levelized cost of energy analysis ».

³⁸ Moyenne sur la période 2015 – 2019. Taux de conversion : 1 tonne de charbon = 6,97 MWh. Commissariat général du développement durable, « 1.4 Les prix du charbon à l'importation et à la consommation sont en hausse malgré une baisse des cours », Bilan énergétique de la France pour 2019, consulté le 8 décembre 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2019/4-14-les-prix-du-charbon-a-limportation-et-a-la-consommation-sont-en-hausse-malgre-une-baisse-des-cours.php>.

2.4.2. VALEUR AJOUTÉE : LE TAUX LE PLUS ÉLEVÉ DES ÉNERGIES FOSSILES

Le taux global de valeur ajoutée directe et indirecte en France utilisé est de 50%. Ce taux global résulte de l'application des différents taux en fonction du type de coût.

- **Pour les coûts fixes d'exploitation, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France utilisé pour l'étude est celui du secteur de la production et distribution d'électricité, qui s'élève à 60% du chiffre d'affaires.** Un taux moyen pour le secteur de la production et distribution d'électricité a été calculé à partir des tableaux entrée – sortie de l'Insee. Le taux de valeur ajoutée directe obtenu s'élève à 35% du chiffre d'affaires du secteur. Le taux de valeur ajoutée indirecte est de 25%³⁹.
- **Pour les coûts d'exploitation variables, la valeur ajoutée directe et indirecte en France est estimée à 14%**⁴⁰. Le taux appliqué aux coûts variables d'exploitation hors combustible est le taux moyen de 60%. En ce qui concerne le combustible, celui-ci n'est pas source de valeur ajoutée pour l'économie française. En effet, le charbon consommé en France est entièrement importé de l'étranger⁴¹ et ne subit aucune transformation sur place⁴².

2.4.3. EMPLOI : BEAUCOUP DE POSTES PAR RAPPORT À LA VALEUR AJOUTÉE DES CENTRALES

Le déclin de la filière charbon entraîne une perte de 28 emplois par million d'euro de valeur ajoutée. En fin 2021, la France ne compte plus que quatre centrales à charbon, réparties sur trois sites (Saint-Avold, Cordemais et Gardanne), pour une puissance cumulée de 2 413 MW. La dernière centrale à avoir définitivement stoppé sa production, le 1^{er} avril 2021, est celle du Havre. Selon un dossier de presse du MTES datant de janvier 2020, les quatre centrales à charbon restantes emploient 545 salariés et génèrent 600 emplois indirects⁴³.

Tableau 9 : Emplois dans la filière charbon en 2021

	Emplois directs	Emplois indirects	Total	Emplois par M€ de valeur ajoutée
Charbon	545	600	1 145	28

Source : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

³⁹ La valeur ajoutée indirecte du secteur est calculée en appliquant le taux de valeur ajoutée directe des fournisseurs, ici 38%, aux consommations intermédiaires. Le taux de valeur ajoutée indirecte correspond à la valeur ajoutée indirecte rapportée au chiffre d'affaires du secteur.

⁴⁰ Le coût variable d'exploitation s'élève à 14€ du MWh, dont 11€ de combustible et 3€ coûts variables hors combustible. Comme le combustible est importé, aucune valeur ajoutée n'est créée en France. Le taux de valeur ajoutée directe et indirecte de 60% est donc appliqué uniquement aux coûts variables d'exploitation hors combustible. La valeur ajoutée indirecte s'élève donc à 1,97€/MWh, pour un coût total de 14€, soit un ratio de 14%.

⁴¹ La dernière mine de charbon en France à avoir fermé est celle de La Houve, en 2004.

⁴² Asterès considère que le coût du transport au sein du territoire français est négligeable.

⁴³ « Fermeture des centrales à charbon d'ici 2022 ».

2.4.4. BILAN : 64 M€ DE VALEUR AJOUTÉE ET 1 800 EMPLOIS PERDUS VIA LA SUBSTITUTION

Au total, le développement de la filière éolienne a entraîné la perte, pour la filière charbon, de 64 M€ de valeur ajoutée en 2021 et 1 800 emplois entre 2012 et 2021. L'essentiel de cette perte de valeur et d'emplois résulte des fermetures de centrales, les baisses de charges étant marginales.

Tableau 10 : Valeur et emplois perdus dans le charbon

	MWh substitués	Impact sur la valeur ajoutée directe et indirecte	Impact sur l'emploi
Charbon	-6 278 926	-64 350 098	-1 830
Dont fermeture de centrale	-6 250 594	-64 294 282	-1 829
Dont baisse de charge	-28 332	-55 816	-2

Sources: Lazard (2020), German Institute of Economic Research (2013), CGEDD (2021), Insee

2.5. LA SUBSTITUTION AU FIOUL : UNE PERTE DE 22M€ DE VALEUR AJOUTÉE

2.5.1. COÛT D'EXPLOITATION : LE COÛT DU COMBUSTIBLE LE PLUS ÉLEVÉ

Le coût total d'exploitation des centrales thermiques à fioul s'élève à 55€/MWh. Ce coût se compose d'une part fixe et d'une part variable⁴⁴.

- **Le coût d'exploitation fixe s'élève à 10€/MWh.** Le calcul repose sur l'hypothèse d'un coût d'exploitation fixe de 6 000€/MW/an⁴⁵
- **Le coût d'exploitation variable s'élève à 44€/MWh.** Ce coût se compose d'un coût d'exploitation variable hors combustible de 6€/MWh⁴⁶ et d'un coût du combustible de 38€/MWh⁴⁷.

⁴⁴ La somme des coûts fixes et variables n'est pas égale au coût total en raison des approximations. Dans le détail : 6,4+37,9+11,4=55,7

⁴⁵ Schröder et al., « Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050 ».

⁴⁶ Schröder et al.

⁴⁷ Prix moyen sur la période 2009 - 2019. Taux de conversion : 1 tonne de fioul = 11,11 MWh. Commissariat général du développement durable, « 1.2 Les prix du pétrole brut et raffiné ont connu des fluctuations modérées en 2019 », Bilan énergétique de la France pour 2019, consulté le 8 décembre 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2019/2-12-les-prix-du-petrole-brut-et-raffine-ont-connu-des-fluctuations-moderees-en-2019.php>.

2.5.2. VALEUR AJOUTÉE : LA PART LOGÉE EN FRANCE EST ESTIMÉE À PARTIR DE LA MOYENNE DU SECTEUR

Le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France utilisé est de 19% des coûts totaux d'exploitation. Ce taux global a été obtenu en appliquant la même méthodologie que pour le charbon⁴⁸.

- **Pour les coûts fixes, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France utilisé est celui du secteur de la production et distribution d'électricité, soit 60%.** En l'absence de données spécifiques aux centrales thermiques à fioul, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte retenu est celui de la moyenne du secteur.
- **Pour les coûts variables, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte utilisé est de 9%**⁴⁹. Pour les coûts d'exploitation variables hors combustible, le taux moyen de 60% a été appliqué. En ce qui concerne le combustible, la valeur logée en France est négligeable. La différence entre le prix du fioul lourd consommé par les centrales thermiques (432€/t en 2019) et son prix à l'importation (431€/t) indique que le combustible importé subit peu de transformation une fois entré sur le territoire français⁵⁰. Pour le calcul de la valeur ajoutée, le coût du combustible n'est donc pas pris en compte.

2.5.3. EMPLOI : LE RATIO LE PLUS ÉLEVÉ DE TOUTES LES SOURCES D'ÉNERGIE ÉTUDIÉES

Le déclin de la filière fioul entraîne une perte de 93 emplois par million d'euro de valeur ajoutée perdue. En 2021, la filière fioul est source de 1250 emplois directs et indirects en France.

- **Le cabinet PwC estime le nombre total d'emplois directs en 2018 dans le secteur électrothermique (gaz, charbon, fioul) à 5 000**⁵¹. Sachant qu'avant la fermeture du site du Havre, les centrales à charbon employaient 705 salariés, les 4295 emplois directs restants sont répartis entre le gaz et le fioul en fonction de leur poids en termes de puissance installée (ce qui suppose un ratio emplois/MW identique pour les deux sources d'énergie).
- **Les emplois indirects dans la filière fioul sont déduits à partir du ratio de la filière charbon (1 emploi direct génère en moyenne 1,1 emploi indirect).** Ces calculs aboutissent à un ratio de 0,6 emploi/MW pour le gaz et 0,5 emploi/MW pour le fioul – ratio qui comprend les emplois directs et indirects. Le nombre d'emplois dans la filière fioul en 2021 est déduit à partir de ces ratios.

Tableau 11 : Emplois dans la filière fioul en 2021

	Emplois directs	Emplois indirects	Total	Emplois par M€ de valeur ajoutée
Fioul	595	655	1 250	93

Source : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, PwC (2020), calculs Asterès

⁴⁸ Détail du calcul : $[(60\% * 11=6,8) + (60\% * 6,3=3,82)] / 56 = 19\%$

⁴⁹ $(6,4 * 60\% = 3,8) / 44,3 = 9\%$

⁵⁰ Commissariat général du développement durable, « 1.2 Les prix du pétrole brut et raffiné ont connu des fluctuations modérées en 2019 ».

⁵¹ PwC, « Etude prospective : emplois et compétences de la filière électrique ».

2.5.4. BILAN : 21 M€ DE VALEUR AJOUTÉE ET 1 900 EMPLOIS PERDUS PAR LA SUBSTITUTION

Au total, le développement de la filière éolienne a entraîné la perte, pour la filière fioul, de 21 M€ de valeur ajoutée en 2021 et plus de 1900 emplois entre 2012 et 2021. L'essentiel de cette perte de valeur résulte des fermetures de centrales, l'impact économique de la baisse de charge étant marginal.

Tableau 12 : Valeur et emplois perdus dans le fioul

	MWh substitués	Impact sur la valeur ajoutée directe et indirecte	Impact sur l'emploi
Fioul	-2 206 721	-20 796 470	-1 937
<i>Dont fermeture de centrale</i>	-1 999 449	-20 004 524	-1 863
<i>Dont baisse de charge</i>	-207 272	-791 946	-74

Sources: Lazard (2020), German Institute of Economic Research (2013), CGEDD (2021), Insee

3. RÉSULTATS : UNE CRÉATION NETTE DE 1,1 MD€ DE VALEUR POUR LA FILIÈRE ÉOLIENNE



Au total, l'impact économique de l'éolien s'élève à 1,1 Md€ nets en 2021 et 17 900 emplois. Cette création de valeur et d'emplois s'est déployée progressivement entre 2012 et 2021 et se divise entre la création brute, l'effet de substitution et les effets d'entraînement. Ces effets sont évalués grâce au Modèle d'Impact d'Asterès (MIA) : chaque euro de valeur ajoutée directe et indirecte nette créée par la filière éolienne génère à son tour 0,9€ de valeur ajoutée supplémentaire pour l'économie française et chaque emploi direct ou indirect net génère à son tour 0,6 emploi supplémentaire.

3.1. EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS : 570 M€ EN 2021 ET 10 700 EMPLOIS EN DIX ANS

Le développement de la filière éolienne a généré 570 M€ nets de valeur ajoutée directe et indirecte en France en 2021. La croissance de la production éolienne a permis de créer 889 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte brute en 2021. En revanche, 233 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte ont été perdus la même année dans le nucléaire par effet de substitution, 64 M€ dans le charbon et 21 M€ dans le fioul. Au total, 318 M€ de valeur ajoutée ont été perdus par effet de substitution. Le taux de création nette est donc de 64%.

La filière éolienne a créé plus de 10 600 emplois nets directs et indirects en France entre 2012 et 2021. L'éolien a créé plus de 16 000 emplois directs et indirects dans sa filière entre 2012 et 2021. En revanche, presque 1 700 emplois directs et indirects ont été perdus dans le nucléaire sur la même période, 1 800 dans le charbon et 1 900 dans le fioul. Au total, presque 5 500 emplois ont été perdus par effet de substitution. Le taux de création nette est donc 66%.

Tableau 13. Impact économique direct et indirect de l'éolien

	TWh d'éolien qui se substituent à la fermeture...	Impact sur la valeur ajoutée (en M€)	Impact sur l'emploi
De centrales au fioul	-2,0	-20	-1 863
De centrales à charbon	-6,3	-64	-1 829
De centrales nucléaires	-5,3	-175	-697
	TWh d'éolien qui compensent la baisse de charge...	Impact sur la valeur ajoutée (en M€)	Impact sur l'emploi
Des centrales au fioul	-0,2	-0	-74
Des centrales à charbon	-0,0	-0	-2
Des centrales nucléaires	-9,3	-9	-996
Bilan			
Eolien	23,1	889	16 126
Energies substituées	-23,0	-318	-5 461
<i>Dont fioul</i>	-2,2	-21	-1 937
<i>Dont charbon</i>	-6,3	-64	-1 830
<i>Dont nucléaire</i>	-14,6	-233	-1 693
Impact net		570	10 665
Taux de création nette		64%	66%

3.2. EFFETS D'ENTRAÎNEMENT SUR L'ÉCONOMIE : 568 M€ ET 7 200 EMPLOIS SUPPLÉMENTAIRES

3.2.1. LE MODÈLE MIA : MODÉLISER LES EFFETS D'ENTRAÎNEMENT D'UN SECTEUR SUR L'ÉCONOMIE

Les effets d'entraînement englobent l'impact des effets directs et indirects sur la dépense courante des entreprises et la consommation des salariés. Ils sont évalués par le modèle d'impact développé par Asterès (voir encadré) qui vise à suivre l'ensemble des flux économiques générés par une entreprise ou un secteur.

- **Le secteur éolien génère de la valeur pour l'ensemble de l'économie *via* des effets indirects, induits et en chaîne.** Les dépenses courantes et les investissements du secteur créent une première vague d'activité chez les prestataires et fournisseurs, c'est « l'effet indirect ». Les salaires versés par le groupe sont pour partie consommés et créent une seconde vague d'activité dans les entreprises vendeuses, c'est « l'effet induit ». Puis ces deux effets, indirect et induit, vont à leur tour impliquer des dépenses courantes, des investissements et des versements de salaires, qui génèrent eux-mêmes de la valeur, et ainsi de suite. C'est « l'effet en chaîne ». Ces effets se réduisent à chaque tour car une partie de la valeur est taxée, une partie des dépenses sont importées et une partie du revenu est épargné.
- **Le modèle d'impact d'Asterès (MIA) est utilisé pour modéliser l'ensemble des flux issus des effets directs et indirects de l'éolien en 2021.** Le solde de la valeur ajoutée indirecte obtenu en 3.1 est comptabilisé dans MIA comme une dépense courante auprès des fournisseurs. Les effets d'entraînement qui s'en suivent sont ensuite évalués par MIA, sur quatre années. Enfin, la valeur ajoutée et l'emploi induits par la consommation des salariés (emplois directs et indirects) sont ajoutés.

PRÉSENTATION DU MODÈLE D'IMPACT D'ASTERÈS (MIA)

La construction du modèle MIA repose sur les matrices entrées-sorties de l'Insee qui éclairent comment la dépense d'une entreprise d'un secteur impacte les autres acteurs de l'économie française. Le modèle mesure l'effet des trois types de flux : le versement des salaires, l'investissement et les dépenses courantes des entreprises (consommations intermédiaires). Le modèle évalue les effets sur l'économie (notamment l'emploi, la valeur ajoutée, la production) et sur les recettes fiscales et sociales grâce à la valeur ajoutée supplémentaires générée par les dépenses initiales.

Le modèle MIA intègre les typologies de consommation selon le niveau de revenu et les temporalités des dépenses. Un investissement n'aura pas le même délai de mise en œuvre que la consommation d'un ménage. *In fine*, les effets d'entraînement sont calculés sur quatre ans, après quoi ils se dissipent et sont

considérés comme nuls. La somme des effets indirects, induits et en chaîne est appelée « effets d'entraînement ».

3.2.2. L'IMPACT ÉCONOMIQUE INDUIT PAR LE DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE ÉOLIENNE : 568 M€ DE VALEUR AJOUTÉE EN 2021 ET 7 200 EMPLOIS EN DIX ANS

La valeur ajoutée induite par les effets directs et indirects nets s'élève à 568 M€ en 2021. Chaque euro de valeur ajoutée directe et indirecte nette créé par les nouvelles éoliennes entraîne 1 euro supplémentaire de valeur ajoutée dans l'économie française. Pour obtenir ce résultat, les commandes issues de la valeur ajoutée directe et indirecte nette et les salaires versés sont introduits dans le modèle MIA comme des stimuli répartis en fonction des secteurs (énergie, transport, maintenant, etc.).

Le développement de la filière éolienne sur la période 2012 - 2021 a induit la création de plus de 7 200 emplois nets via les effets en chaîne, en plus des emplois directs et indirects. Pour chaque emploi lié directement ou indirectement à la filière éolienne, 0,7 emploi supplémentaire est créé dans l'économie française.

3.3. EFFETS TOTAUX : 1,1 MD€ DE VALEUR AJOUTÉE EN 2021 ET 17 900 EMPLOIS EN DIX ANS

La valeur ajoutée totale générée par le développement de la filière éolienne en France s'élève à 1,1 Mds€ en 2021. Cette valeur ajoutée totale se décompose entre 570 M€ d'effet direct et indirect et 568 M€ d'effet d'entraînement sur le reste de l'économie.

Au total, la filière éolienne a généré presque 17 900 nouveaux emplois en France entre 2012 et 2021. Cet effet global se divise entre 10 700 emplois directs et indirects et 7 200 emplois liés aux effets d'entraînement.

Tableau 14 : Impact économique total de l'éolien

	Effets directs et indirects		Effets d'entraînement		Total	
	Sur la valeur ajoutée (en M€)	Sur l'emploi	Sur la valeur ajoutée (en M€)	Sur l'emploi	Valeur ajoutée	Emploi
Eolien	889	16 126	795	10 025	1 684	26 150
Energies substituées	-318	-5 461	-228	-2 816	-546	-8 276
<i>dont fioul</i>	-21	-1 937	-32	-110	-53	-2 047
<i>dont charbon</i>	-64	-1 830	-52	-735	-116	-2 565
<i>dont nucléaire</i>	-233	-1 693	-144	-1 971	-377	-3 664
Impact net	570	10 665	568	7 209	1 138	17 874

4. PROSPECTIVE : UNE
CRÉATION NETTE DE
1,1 MD€ À HORIZON 2030
POUR L'ÉOLIEN



D'ici 2030, la hausse de production éolienne reposera pour partie sur une hausse nette de la consommation d'électricité, pour partie sur une substitution aux énergies produisant déjà de l'électricité et pour partie à l'essence et au diesel. Ainsi, d'une part, la nouvelle production éolienne devrait se substituer pour 17% à l'électricité d'origine nucléaire, 9% à l'électricité issue des centrales à gaz, 5% à l'électricité issue des centrales à charbon et au fioul, 15% à la consommation d'essence et de diesel. D'autre part, 55% de l'énergie éolienne supplémentaire ne se substituera pas à des productions existantes. En suivant la même méthode que pour 2012 – 2021 et en prenant en compte les effets directs, indirects et en chaîne, le développement de la filière éolienne devrait permettre de créer 1,1 Md€ de valeur ajoutée en 2030 et plus de 17 500 emplois.

4.1. SUBSTITUTION : À HORIZON 2030, L'ÉOLIEN TERRESTRE REMPLACERA AUSSI DU GAZ, DU DIESEL ET DE L'ESSENCE

4.1.1. DONNÉES ET MÉTHODE : PRENDRE EN COMPTE LA SUBSTITUTION À DES USAGES NON-ÉLECTRIQUES

Les données sur la production électrique par filière en 2030 proviennent du bilan prévisionnel à horizon 2030 de RTE⁵². Deux scénarios ont été établis par RTE. Le premier se fonde sur l'hypothèse de l'atteinte des objectifs de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Le second se base sur l'hypothèse d'une atteinte seulement partielle de ces objectifs. L'écart entre ces deux scénarios est de 3 points de pourcentage : la part du nucléaire dans le mix est légèrement plus élevée dans le scénario 2 et celle des EnR légèrement moins élevée. Pour ses calculs, Asterès s'est fondé sur le premier scénario. En se basant sur les prévisions RTE, la présente étude vise à évaluer l'effet économique de ces choix énergétiques. Les autres scénarii, par exemple celui d'un essor supérieur du solaire, du nucléaire ou des fossiles ne sont pas chiffrés. La création de valeur liée à la montée en puissance de l'éolien n'est donc pas comparée à des potentielles créations de valeur liées à d'autres choix. Asterès ne s'intéresse qu'à l'éolien terrestre et ne chiffre pas l'impact de l'émergence de l'éolien marin.

Cette fois, la substitution doit également prendre en compte les transferts d'usage des énergies fossiles vers l'électricité. Selon RTE, à partir de 2024, les gains d'efficacité énergétique ne seront plus suffisants pour compenser les transferts d'usage vers l'électricité⁵³. La production d'électricité devrait ainsi augmenter de 56 TWh en 2030 par rapport à 2021, pour atteindre 597 TWh, un niveau inédit. Contrairement à la période passée, la production d'électricité d'origine éolienne ne se substituera pas

⁵² « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France », figure 18 « Évolution des bilans énergétiques en France (en TWh) », p. 39.

⁵³ « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France », p. 20.

entièrement à d'autres filières de production d'électricité, mais aussi à des consommations directes d'énergie fossile (pour se chauffer et se déplacer). L'augmentation nette de la production d'électricité supportée par le développement de la filière éolienne doit donc être décomposée avec une nouvelle méthode.

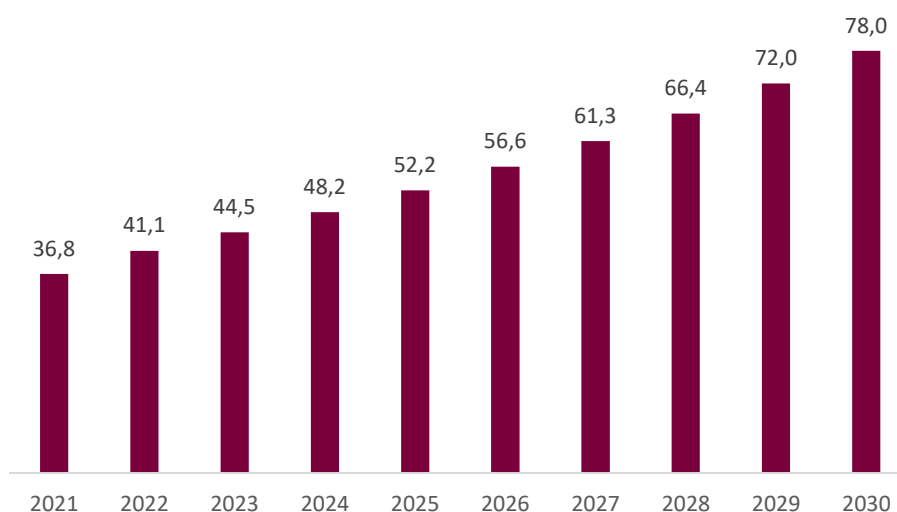
Il convient de poser des hypothèses concernant la croissance démographique et économique. Pour la projection d'ici 2030, Asterès postule que les effets de la croissance démographique et de l'activité économique seront entièrement compensés par les gains d'efficacité énergétique, comme ce fut le cas les dix dernières années. La croissance démographique ne devrait en effet pas accélérer d'ici 2030, selon les projections de l'Insee⁵⁴. La croissance économique est difficile à anticiper à dix ans et Asterès considère que, comme pour la période 2012 – 2021, la consommation issue de la croissance économique sera compensée par des gains d'efficacité énergétique.

4.1.2. EOLIEN TERRESTRE : LA HAUSSE DEVRAIT SE POURSUIVRE

La production éolienne devrait augmenter de 41,2 TWh d'ici 2030. L'électricité d'origine éolienne devrait passer de 36,8 TWh en 2021 à 78,0 TWh en 2030 selon les estimations de RTE. La part de l'éolien dans le mix de production électrique devrait ainsi presque doubler, passant de 7,0% à 13,1%. Le rythme de progression de l'éolien sur les dix prochaines années devrait donc être comparable à celui enregistré les dix dernières années.

La puissance installée du parc éolien terrestre devrait augmenter de 19 GW d'ici 2030. La puissance du parc éolien terrestre devrait passer de 18,8 GW en 2021 à 37,9 GW en 2030. La part de l'éolien terrestre dans le parc total passerait ainsi de 14% à 20%, une progression moins forte que sur la période précédente puisque la puissance du parc avait quadruplé entre 2012 et 2021.

Graphique 2 : Évolution de la production d'électricité d'origine éolienne entre 2021 et 2030 (en TWh)



⁵⁴ Nathalie Blanpain et Guillaume Buisson, « Projections de population à l'horizon 2070 - Insee Première - 1619 », Insee, consulté le 21 décembre 2021, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2496228>.

Source : RTE, calculs Asterès

Les valeurs entre 2021 et 2030 ont été calculés sur la base taux de croissance annuel moyen de 8,3%. Note : la production éolienne en 2021 correspond aux chiffres officiels de RTE et non, comme dans la partie historique, au chiffre corrigé des variations conjoncturelles sur la période 2012 – 2021, d'où la légère la différence avec la donnée de la partie 1.

4.1.3. MIX ÉNERGÉTIQUE : LE NUCLÉAIRE POURSUIT SA BAISSSE, LE CHARBON DISPARAIT, LE FIOUL RESTE MARGINAL ET LE GAZ COMMENCE À DÉCLINER

Les baisses de production d'électricité devraient concerner principalement le nucléaire et le gaz.

La production d'électricité d'origine nucléaire devrait passer de 360,7 TWh en 2021 à 343 TWh en 2030. La part du nucléaire dans le mix énergétique passerait ainsi de 69% à 57% d'ici 2030. Contrairement à la période passée, la production de la filière gaz devrait également diminuer, pour passer de 32,9 TWh en 2021 à 23,0 TWh en 2030. La part du gaz dans le mix énergétique devrait ainsi passer de 6% à 4% d'ici 2030. La production de la filière charbon devrait être réduite à zéro d'ici 2022 et la production de la filière fioul serait marginale, à hauteur de 0,5 TWh en 2030.

Ces baisses seront majoritairement dues aux baisses de charge des centrales nucléaires et à gaz.

La baisse de production de la filière gaz d'ici 2030 sera imputable à 69% aux baisses de charge des centrales qui resteront en activité et à 31% aux fermetures de centrales. La baisse de production de la filière nucléaire résultera à 59% de la baisse de charge et à 41% de la fermeture de centrales. Enfin, pour le fioul et le charbon, l'essentiel de la baisse de production résultera de la fermeture de centrales.

Tableau 15 : Prédiction du mix énergétique à horizon 2030

	2021	% du mix	2030p	% du mix	Variation de la production
Solaire PV	14,3	3%	57,0	10%	42,7
Éolien terrestre	36,8	7,0%	78,0	13%	41,2
Éolien marin	0,0	0%	18,0	3%	18,0
Nucléaire	360,7	69%	343,0	57%	-17,7
Hydraulique	62,5	12%	67,0	11%	4,5
Bioénergies	10,0	2%	10,8	2%	0,8
Charbon	3,8	1%	0,0	0%	-3,8
Fioul	1,9	0%	0,5	0%	-1,4
Gaz	32,9	6%	23,0	4%	-9,9
Total	523	100%	597	100%	74,4

Source : RTE Bilan prévisionnel 2021, calculs Asterès

4.1.4. SUBSTITUTION AUX FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ : UN PROGRÈS DE L'ÉOLIEN PRINCIPALEMENT AUX DÉPENS DU NUCLÉAIRE ET DU GAZ

L'éolien se substituera à 31% à d'autres sources d'énergies produisant de l'électricité.

L'augmentation de la production de la filière éolienne entre 2021 et 2030 se substituera à 17% à du nucléaire, dont 11% à la production des centrales qui auront fermé, à 9% à du gaz, dont 3% à des fermetures. Seulement 4% de la nouvelle production éolienne servira à compenser la fermeture des

dernières centrales à charbon et 1% la fermeture des centrales à fioul. Le reste, soit 65%, correspond à une augmentation nette de la production d'électricité.

Tableau 16 : Taux de substitution sur la période 2021 – 2030, hors nouveaux usages

	Fermeture de centrales	Baisse de charge
Nucléaire	11%	6%
Charbon	4%	0%
Fioul	1%	0%
Gaz	3%	6%
Augmentation nette	65%	

Source : RTE, calculs Asterès

4.1.5. AUGMENTATION NETTE DE LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ : UNE PART SE SUBSTITUTE *IN FINE* À L'ESSENCE ET AU DIESEL

L'augmentation future de la consommation d'électricité résultera essentiellement du verdissement de la production d'hydrogène et du développement des véhicules électriques. Ces deux innovations devraient entraîner des augmentations brutes respectives de la consommation d'électricité de 25 TWh et de 19 TWh. Les gains d'efficacité ne seront pas suffisants pour compenser entièrement la hausse d'après RTE⁵⁵. À l'inverse, la consommation électrique liée au chauffage, à l'eau chaude, à la cuisson et à l'électrification des procédés industriels devrait être compensée par des gains d'efficacité. L'augmentation nette de la consommation d'électricité en 2030 par rapport à 2021 se décompose entre 57% pour la production d'hydrogène et 43% pour les véhicules électriques.

Finalement, 15% de la production supplémentaire éolienne devrait se substituer au diesel et à l'essence. En effet, quand sur la période, 31% de la production éolienne supplémentaire devrait se substituer à d'autres formes de production d'électricité, les 65% d'augmentation nette de la production d'électricité peuvent être décomposés entre 35% de production exportée et 34% consommée à domicile⁵⁶.

⁵⁵ « Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France », p. 31.

⁵⁶ Calculs Asterès à partir du Bilan prévisionnel de RTE, en 2030 : 83% de la production d'électricité sera consommée à domicile, 16% sera exportée et 1% sera stockée, soit une hausse des exportations et de la demande interne de 37 TWh et de 24 TWh par rapport à 2021, et une baisse du stockage de 2 TWh. On en déduit que 61% de la production supplémentaire répondra à la demande externe et 39% à la demande interne.

Tableau 17. Taux de substitution sur la période 2021 – 2030, avec nouveaux usages

	Taux de substitution	Dont fermeture de centrales	Dont variation du facteur de charge
Nucléaire	17%	11%	6%
Charbon	4%	4%	0%
Fioul	1%	1%	0%
Gaz	9%	3%	6%
Essence et diesel	15%		

Source : RTE, calculs Asterès

4.2. VALEUR DIRECTE ET INDIRECTE EN FRANCE : ÉVALUATION POUR L'ÉOLIEN EN 2030, LE GAZ, L'ESSENCE ET LE DIESEL

4.2.1. ÉOLIEN À HORIZON 2030 : VERS UNE BAISSÉ DU COÛT DE PRODUCTION

A horizon 2030, le coût de production de l'électricité d'origine éolienne devrait baisser, sous la conjonction de la baisse des coûts d'exploitation et des coûts d'investissement. En supposant que les taux de valeur ajoutée restent inchangés, cette baisse des coûts entraînera mécaniquement une baisse de la valeur ajoutée directe et indirecte créée sur le territoire français.

- **Le coût d'exploitation du parc éolien devrait passer à 19€/MWh.** Selon l'ADEME, le coût d'exploitation moyen d'exploitation du parc éolien devrait passer de 47 500€/MW/an en 2019 à 38 500€/MW/an en 2030⁵⁷.
- **Le coût d'investissement de l'éolien devrait passer à 32€/MWh.** Les investissements dans l'éolien devraient rester stables entre 2021 et 2030 selon les données du SER⁵⁸. Comme la production éolienne augmente sur la période, le coût d'investissement rapporté au MWh diminue mécaniquement.

⁵⁷ Haeusler et al., « Coûts des énergies renouvelables et de récupération ».

⁵⁸ La valeur ajoutée brute liée aux investissements est stable sur la période selon les données du SER. Or comme rien n'indique que les hypothèses sur le taux de valeur ajoutée ont été modifiées, Asterès estime que le niveau des investissements devrait se maintenir.

4.2.2. CENTRALES À GAZ : DES COÛTS VARIABLES ÉLEVÉS DONC UNE BAISSÉ DE VALEUR AJOUTÉE NON-NÉGLIGEABLE

Le coût total d'exploitation des centrales à gaz s'élève à 34€/MWh. Pour les énergies auxquelles l'éolien se substitue à horizon 2030, les données actuelles sont utilisées car les installations sont déjà en place et les coûts ne devraient pas varier. Dans le détail, les coûts fixes d'exploitation des centrales à gaz s'élèvent à 7€/MWh. Ce résultat a été obtenu en retenant l'hypothèse d'un coût fixe d'exploitation de 18 150€/MW/an⁵⁹. Et les coûts variables d'exploitation des centrales à gaz s'élèvent à 27€/MWh. Ils se divisent entre les coûts d'exploitation variables hors combustible, de 3€/MWh⁶⁰, et le coût du combustible, de 24€/MWh.

Le taux global de valeur ajoutée directe et indirecte des centrales à gaz en France retenu pour l'étude est de 31%. Ce taux global résulte de l'application de différents taux de valeur ajoutée en fonction du type de coût⁶¹. Pour les coûts fixes d'exploitation, le taux retenu est celui du secteur de la production et distribution d'électricité, soit 60%, à cause du manque de données spécifiques aux centrales à gaz. Pour les coûts d'exploitation variables, le taux de valeur ajoutée directe et indirecte est estimé à 25%⁶², divisé entre les coûts d'exploitation variables hors combustible où le taux moyen de 60% est appliqué, et le prix du gaz à la consommation qui est décomposé à partir des données du SDES⁶³ pour en déduire un taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France de 21%⁶⁴.

Le déclin de la filière gaz devrait entraîner une perte de 41 emplois par million d'euro de valeur ajoutée perdue. En reprenant la méthode utilisée en 2.5.3, Asterès estime que la filière gaz emploie directement plus de 3 500 personnes et génère plus de 3 800 emplois indirects.

Tableau 18 : Emplois dans la filière gaz en 2021

	Emplois directs	Emplois indirects	Total	Emplois par M€ de valeur ajoutée
Gaz	3524	3880	7405	41

Source : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, PwC (2020), calculs Asterès

4.2.3. RAFFINAGE DU PÉTROLE : UN CHIFFRE D'AFFAIRES ÉLEVÉ MAIS DES TAUX D'EMPLOI ET DE VALEUR AJOUTÉE LOGÉE EN FRANCE TRÈS FAIBLES

Le chiffre d'affaires réalisé par les raffineries françaises sur la production d'essence et de diesel équivaut à 856€/MWh. Le chiffre total du secteur cokéfaction et raffinage s'élève à 30 Mds€ selon les

⁵⁹ Moyenne des estimations faites par la littérature (filiale CCGT). Schröder et al., « Current and Prospective Costs of Electricity Generation until 2050 ».

⁶⁰ Moyenne des estimations faites par la littérature (filiale CCGT). Schröder et al.

⁶¹ Détails du calcul : $[(21\% * 24 = 5,2) + (60\% * 3 = 1,7) + (60\% * 6 = 3,5)] / 33 = 31\%$

⁶² Détail du calcul : $[(21\% * 24 = 5,2) + (60\% * 3 = 1,7)] / 27 = 25\%$

⁶³ Commissariat général du développement durable, « 1.3 Des prix du gaz en baisse, sauf dans le résidentiel », Bilan énergétique de la France pour 2019, consulté le 22 décembre 2021, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-energetique-2019/3-13-des-prix-du-gaz-en-baisse--sauf-dans-le-residentiel.php>.

⁶⁴ Cf. Annexe 6 pour les détails du calcul.

tableaux d'entrée - sortie de l'Insee, dont la quasi-totalité provient des raffineries⁶⁵. D'après, l'Union française des industries pétrolières (Ufip), le diesel et l'essence représentent 52% de la production des raffineries en France⁶⁶, soit presque 16 Mds€ de chiffre d'affaires. La production des raffineries est ensuite convertie en équivalent MWh⁶⁷.

Le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France est de seulement 10%⁶⁸. Le taux de valeur ajoutée direct du secteur cokéfaction et raffinerie représente 9% du chiffre d'affaires, d'après les données de l'Insee. Le taux de valeur ajoutée indirecte, qui prend en compte la valeur générée par le transport et le stockage de l'essence et du diesel, est de seulement 1%.

La baisse de production d'essence et de diesel va entraîner une perte de seulement 5 emplois par million d'euro de valeur ajoutée. Le raffinage du pétrole pour produire du diesel et de l'essence est source de presque 8 300 emplois en France⁶⁹. D'une part, la production d'essence et de diesel génère plus de 5 200 emplois directs. D'après l'Ufip, les sept raffineries en France emploient environ 10 000 personnes. Le nombre d'emplois nécessaires à la production d'essence et de diesel est alors déduit en supposant que le taux de production par emploi est le même pour chaque produit raffiné. D'autre part, le transport et le stockage de l'essence et du diesel génèrent plus de 3 000 emplois supplémentaires. Les dépenses des raffineries françaises alloués au transport et au stockage des produits pétroliers représentent 0,5% du chiffre d'affaires total du secteur transports et entreposage et génèrent donc 6 000 emplois dans le secteur⁷⁰. Le nombre d'emplois indirects générés par le stockage de l'essence et du diesel peuvent ensuite être déduit en supposant un même taux de production par emploi pour chaque produit raffiné.

Tableau 19 : Emplois liés à la production d'essence et de diesel

	Emplois directs	Emplois indirects	Total	Emplois par M€ de valeur ajoutée
Diesel	3 330	1 970	5 300	
Essence	1 880	1 112	2 992	
Total	5 210	3 082	8 292	5

Source : Insee, Ufip

⁶⁵ Le poids du secteur cokéfaction est négligé car il n'existait, en 2016, qu'une seule entreprise de cokéfaction selon l'Insee. De plus les chiffres de l'Ufip sur les emplois dans les raffineries indiquent que le secteur cokéfaction ne pèse que très peu (10 000 emplois dans le raffinage selon l'Ufip et 9 000 dans l'ensemble de la cokéfaction et raffinage selon les données de l'Insee).

⁶⁶ Les 7 raffineries en France produisent 56,4 Mt de produits raffinés, dont 18,8Mt (33,3%) de diesel et 10,6Mt (18,8%) d'essence. « Approvisionnement de la France en carburant » (Union Française des Industries Pétrolières, septembre 2017), [https://www.ufip.fr/uploads/img/septembre%202017_UFIP%20lapprovisionnement%20de%20la%20France%20en%20carburants\(2\).pdf](https://www.ufip.fr/uploads/img/septembre%202017_UFIP%20lapprovisionnement%20de%20la%20France%20en%20carburants(2).pdf).

⁶⁷ Les taux de conversion utilisés proviennent du site du Gouvernement du Canada. Cf. annexe 7 pour les détails de la conversion. Ressources naturelles Canada, « Explication des tableaux » (Ressources naturelles Canada, 11 septembre 2018), <https://www.rncan.gc.ca/efficacite-energetique/efficacite-energetique-transports-carburants-replacement/vehicules-personnels/choisir-bon-vehicule/achat-dun-vehicule-electrique/explication-des-tableaux/21384>.

⁶⁸ $[(9\% * 15,9\text{Mds}) + (8\% * (15,9\text{Mds} - 1,4\text{Mds}))] / 15,9 \text{ Mds} = 0,16$

⁶⁹ Dans cette étude, l'impact sur les stations-services n'est pas pris en compte.

⁷⁰ Le nombre total d'emplois dans le secteur transports et entreposage s'élève à 1 301 000 ETP. $1,3\text{M} * 0,5\% = 5 915 \text{ ETP}$.

4.3. RÉSULTATS : 1,1 MD€ DE VALEUR AJOUTÉE ET PLUS DE 17 500 EMPLOIS SUPPLÉMENTAIRES EN 2030

4.3.1. EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS : UN TAUX DE CRÉATION NETTE FUTUR MOINS ÉLEVÉ QUE SUR LES DIX DERNIÈRES ANNÉES

Le développement futur de la filière éolienne devrait créer 472 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte nette pour l'économie française en 2030. La valeur ajoutée directe et indirecte brute créée par la croissance de la production éolienne devrait atteindre 977 M€ en 2030. En revanche, 505 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte seront perdus dans les autres filières. Le taux de création nette est donc de 48%, soit inférieur à 2021 (64%). La différence s'explique notamment par le taux de substitution et le type d'énergies auxquelles l'éolien se substitue.

Le développement de la filière éolienne devrait également créer approximativement 9 900 emplois directs et indirects nets d'ici 2030. La croissance de la production éolienne devrait permettre de créer, directement ou indirectement, presque 16 400 emplois bruts d'ici 2030. En revanche, presque 6 500 emplois directs et indirects seront perdus dans les autres filières, soit un taux de création nette de 60%.

Tableau 20. Impact économique direct et indirect de l'éolien en 2030

	TWh d'éolien substitués	Impact sur la valeur ajoutée en M€	Impact sur l'emploi
Au fioul	-1	-5	-511
Au charbon	-1	-15	-427
Au nucléaire	-7	-162	-2 778
Dont fermeture	-1	-15	-2 526
Dont baisse de charge	-2	-15	-252
Au gaz	-4	-31	-1 248
Dont fermeture	-1	-13	-539
Dont baisse de charge	-3	-17	-709
A l'essence et au diesel	-6	-292	-1 513
		Bilan	
Eolien	41	977	16 374
Energies substituées	-19	-505	-6 477
Impact net		472	9 897
Taux de création nette		48%	60%

4.3.2. EFFETS D'ENTRAÎNEMENT : LÉGÈREMENT PLUS IMPORTANTS QUE SUR LES DIX DERNIÈRES ANNÉES

Les effets directs et indirects nets du développement de l'éolien devraient générer 599 M€ de valeur ajoutée supplémentaire à horizon 2030 via les effets d'entraînement. Pour un euro de valeur ajoutée directe et indirecte nette créé par les nouvelles éoliennes en 2030, 1,3 euro supplémentaire de valeur ajoutée devrait être créé dans l'économie française. Ces résultats sont issus de l'usage du modèle MIA : la création nette d'emplois en France lié au développement de l'éolien, et les commandes issues

de la valeur ajoutée directe et indirecte constituent des stimuli qui créent en chaîne d'autres consommations et commandes dans l'ensemble de l'économie française.

Ces effets d'entraînement vont créer presque 7 600 emplois à horizon 2030. Pour un emploi créé directement ou indirectement par la filière éolienne, 0,8 emploi supplémentaire devrait être créé dans l'économie française.

4.3.3. EFFETS TOTAUX : 1,1 Md€ DE VALEUR AJOUTÉE ET 17 500 EMPLOIS SUPPLÉMENTAIRES

Au total, l'impact économique net du développement des éoliennes devrait se chiffrer à 1,1 Md€ en 2030. La création de valeur ajoutée pour l'économie française se distingue entre 472 M€ de valeur ajoutée directe et indirecte, et 599 M€ de valeur ajoutée liée aux effets d'entraînement.

Au total, la croissance de la production éolienne devrait entraîner la création de plus de 17 500 emplois entre 2021 et 2030. Les créations d'emplois sont constituées de 9 900 emplois directs et indirects et 7 600 emplois liés aux effets d'entraînement.

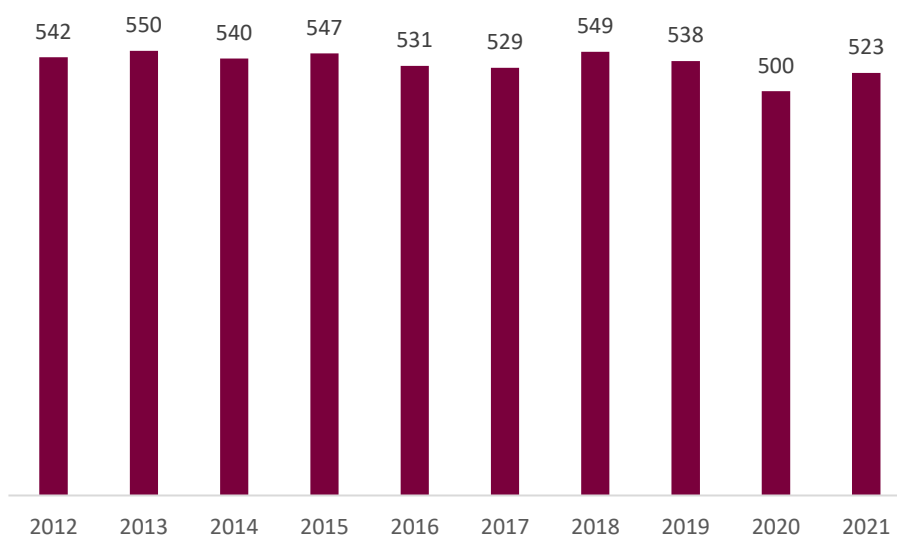
Tableau 21 : Impact économique total de l'éolien en 2030

	Effets directs et indirects		Effets d'entraînement		Total	
	Sur la valeur ajoutée (en M€)	Sur l'emploi	Sur la valeur ajoutée (en M€)	Sur l'emploi	Valeur ajoutée	Emploi
Eolien	977	16 374	858	10 819	1 836	27 193
Energies substituées	-505	-6 477	-260	-3 257	-765	-9 734
Dont fioul	-5	-511	-8	-111	-14	-622
Dont charbon	-15	-427	-13	-171	-28	-598
Dont nucléaire	-162	-2 778	-122	-1 543	-284	-4 321
Dont gaz	-31	-1 248	-48	-539	-78	-1 787
Dont essence et diesel	-292	-1 513	-69	-893	-361	-2 405
Impact net	472	9 897	599	7 561	1 071	17 459

5. ANNEXES

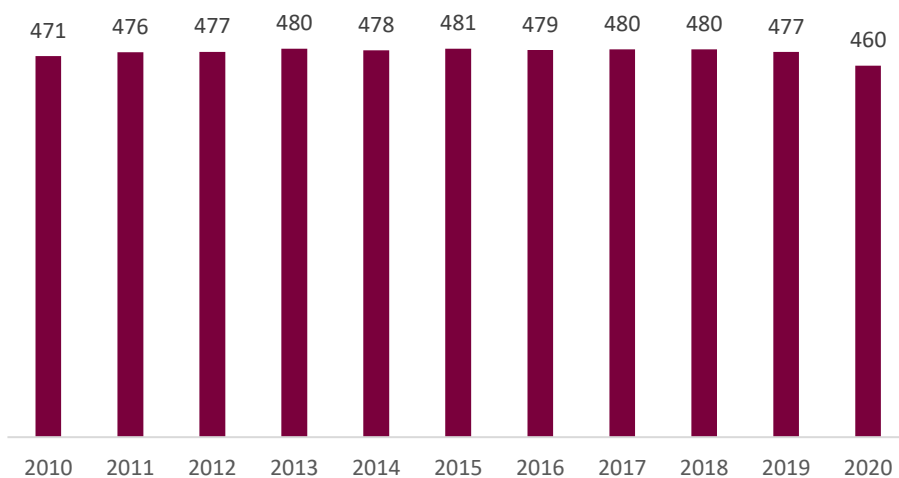


Annexe 1 : Production annuelle d'électricité entre 2012 et 2021 (en TWh)



Source : RTE, Bilan électrique 2021

Annexe 2 : Consommation annuelle de l'électricité corrigée de l'aléa météorologique (en TWh)



Source : RTE, Bilan électrique 2021

Annexe 3. Production d'électricité par filière en TWh, sans lissage des variations conjoncturelles

	2012	% du mix	2021	% du mix
Fioul	6,7	1,2%	1,9	0,4%
Charbon	17,4	3,2%	3,8	0,7%
Gaz	24	4,4%	32,9	6,3%
Hydraulique	63,8	11,8%	62,5	12,0%
Nucléaire	405	74,8%	360,7	69,0%
Eolienne	14,9	2,8%	36,8	7,0%
Solaire	4,1	0,8%	14,3	2,7%
Bioénergie	5,8	1,1%	10,0	1,9%
Total	541,7	100%	522,90	100%

Source : RTE, Bilan électrique 2021

Annexe 4 : Détail du coût d'exploitation des centrales nucléaires en France

	Coût en M€
Dépenses d'exploitation	10 003
Investissements sur le parc existant	3 804
Provision pour gestion des déchets et du combustible usé	1 301
Provision pour démantèlement	50
Total	15 158
Coût en €/MW	240 108

Source : Cour des compte 2014, p. 11, calculs Asterès

Annexe 5 : Calcul du taux de valeur ajoutée directe et indirecte lié aux coûts variables

Valeur ajoutée liée au combustible :

- Le coût du combustible s'élève 5,67€/MWh selon la Cour des comptes.
- 1/3 des dépenses de combustible correspondent à des importations selon la Sfen, dont seulement 2/3 créent de la valeur ajoutée en France, soit 3,8€/MWh.
- À ces 3,8€/MWh sont appliqués le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France de 84%.
- Le résultat obtenu est **3,17€/MWh** de valeur ajoutée directe et indirecte en France.

Valeur ajoutée liée au reste de la part variable des dépenses d'exploitation

- Le coût d'exploitation variable hors combustible s'élève à 3,70€/MWh
- Le taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France de 84% est appliqué.
- Le résultat obtenu est de 3,10€/MWh

Valeur ajoutée directe et indirecte créée sur le territoire français par les dépenses d'exploitation variables

- Le taux de valeur ajoutée directe indirecte en France est donc de $(3,17+3,10=6,26\text{€}^*) / (5,67+3,70=9,37\text{€})$, soit **67%**.

*Note : Les valeurs présentées ci-dessus sont approximatives, d'où le fait que l'on ne retombe pas exactement sur le bon chiffre.

Annexe 6 : Valeur ajoutée directe et indirecte générée en France par le transport, la distribution et le stockage du gaz

	Prix moyen du gaz tous secteurs confondus, hors TVA en 2019 (en €/MWh)	Part de chaque composante	Prix moyen du gaz payé par les producteurs d'électricité (moyenne sur la période 2011 - 2019)	Valeur ajoutée directe logée en France en €/MWh	Valeur ajoutée indirecte logée en France en €/MWh	Taux de valeur ajoutée directe et indirecte en France
Total	39,6	100%	24,5	3,2	2,0	21%
Dont importation	17,5	44%	10,8	-	-	
Dont marges	3,1	8%	1,9	-	-	
Dont infrastructures	13,2	33%	8,2	3,2	2,0	
Dont distribution	7,13	18%	4,4	1,5	1,1	
Dont transport	3,7	9%	2,3	1,0	0,5	
Dont stockage	1,5	4%	0,9	0,4	0,2	
Dont terminaux métaniers	0,92	2%	0,6	0,2	0,1	
Dont taxes hors TVA	5,8	15%	3,6	-	-	

Source : CGEDD, Insee

Note : Taux de valeur ajoutée directe pour le secteur de la production et distribution de gaz : 35% ; taux de valeur ajoutée indirecte : 38%. Taux de valeur ajoutée indirecte pour le secteur du transport et entreposage : 45% ; taux de valeur ajoutée indirecte : 43%.

Annexe 7 : Conversion de la production d'essence et de diesel en équivalent MWh

	Mt	L	Equivalent KWh	Conversion en MWh
Production de diesel	18,8	22 149 425 287	221 494 252 874	22 149 425
Production d'essence	10,6	12 488 505 747	111 147 701 149	11 114 770

Source : Gouvernement du Canada

Note : Un litre d'essence contient l'énergie équivalant à 8,9 kWh d'électricité.

Un litre de diesel contient l'énergie équivalant à 10 kWh d'électricité (car 1L d'essence équivaut à 0,89L de diesel).

CHARTRE ETHIQUE

Asterès est régulièrement sollicité par des entreprises et des fédérations professionnelles pour intervenir en amont de leurs activités de lobbying, particulièrement lors des débats d'orientation budgétaire. Asterès peut donc être amené à réaliser des travaux financés par des donneurs d'ordres et démontrant l'impact économiquement nocif d'une mesure qui pourrait leur être appliquée.

Dans ce cas, notre démarche répond à une charte éthique stricte. Notre client s'engage à accepter que les travaux menés par Asterès répondent aux principes intangibles suivants :

- Asterès ne peut s'engager sur les résultats d'une étude avant de l'avoir réalisée. Nous ne délivrons nos conclusions qu'au terme de nos analyses.
- Nos travaux suivent une méthodologie standard (*top down*), qui s'appuie sur l'utilisation de données statistiques publiques, ou conçues par nous-mêmes.
- Si un client souhaite modifier des conclusions de travaux réalisés par Asterès sans une totale approbation de nos consultants, il devient le seul signataire de l'étude, et n'a plus le droit d'utiliser la marque Asterès.
- Les consultants d'Asterès ne défendent dans le débat public que des travaux qu'ils ont réalisés eux-mêmes. En aucun cas ils n'acceptent de se faire le relais de travaux réalisés par d'autres.

A S T E R è S
études, recherche & conseil économique

ASTERES ETUDES & CONSEIL

81 rue Réaumur,

75002 PARIS 01 44 76 89 16

contact@asteres.fr