



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

DOCUMENT DE TRAVAIL

Les panneaux solaires bas-carbone en France : un enjeu environnemental, une opportunité industrielle ?

Octobre 2021

Résumé

L'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques n'est pas neutre en carbone en analyse de cycle de vie car la fabrication de ces panneaux nécessite elle-même beaucoup d'électricité, ce qui, en fonction du mix électrique du pays de fabrication, peut se traduire par des émissions élevées de gaz à effet de serre.

Pour que le développement de l'électricité photovoltaïque contribue à la baisse globale des émissions de gaz à effet de serre, il est essentiel que le soutien public à l'énergie photovoltaïque cible en priorité des panneaux solaires peu carbonés. Depuis 2011, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) a ainsi introduit un critère d'empreinte carbone pour sélectionner les projets de centrales photovoltaïques dans le cadre de ses appels d'offres.

Ce critère carbone semble avoir eu un impact dynamique significatif en incitant les acteurs à acheter des panneaux moins carbonés, mais ne semble aujourd'hui plus très discriminant. Le critère carbone a également favorisé l'installation en France de panneaux utilisant la technologie des couches minces au détriment de la technologie dominante des panneaux au silicium. La technologie des couches minces génère moins d'émissions de gaz à effet de serre, mais implique d'autres problèmes environnementaux liés à la toxicité élevée d'un de ses composants principaux, le cadmium.

Un scénario illustratif de réforme, combinant un critère carbone plus discriminant et une prise en compte de la toxicité environnementale des panneaux à couches minces, permettrait à la fois de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer les coûts sociaux et environnementaux associés à l'utilisation du cadmium. Un tel scénario conduirait également à une augmentation des parts de marché des modules fabriqués en France.

Remerciements

L'auteur remercie la direction générale de l'énergie et du climat (bureau de la production renouvelable et des énergies renouvelables) pour la mise à disposition des données et l'appui apporté à la compréhension des procédures des appels d'offres. Il remercie également Doris Nicklaus, Antonin Vergez et Vincent Marcus pour leur accueil, leurs conseils et leurs relectures.

L'auteur remercie enfin tout particulièrement Stéphane Gloriant, disparu brutalement en août 2020, pour son encadrement tout au long du stage et pour ces précieux conseils. Ce travail lui doit énormément et cette publication lui est dédiée.

Auteur

Louis-Samuel PILCER (stagiaire à la sous-direction de l'économie et de l'évaluation du Commissariat général au développement durable lors de la réalisation de cette étude, *Policy Analysis Exercise* pour le Master of Public Policy, Harvard Kennedy School)

Les jugements et opinions exprimés dans ce document n'engagent que l'auteur, et non les institutions auxquelles il appartient, ni a fortiori le ministère de la Transition écologique.

SOMMAIRE

<i>I. Le soutien au photovoltaïque bas-carbone</i>	6
a. L'essentiel du soutien public à l'électricité solaire passe par les appels d'offre du MTE	6
b. Ces appels d'offre prennent en compte le contenu carbone des panneaux sous la forme d'une « note carbone »	7
c. Description des données étudiées	8
<i>II. La pollution liée à la fabrication des panneaux solaires</i>	8
a. La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques est énergivore et peut générer des émissions de gaz à effet de serre importantes	9
b. Ces émissions dépendent fortement de la provenance des différentes composantes du panneau	10
c. Les panneaux solaires fabriqués en France sont plus propres que les panneaux importés	10
<i>III. Bilan du soutien public au photovoltaïque bas-carbone</i>	12
a. Centrales au sol : la prise en compte de l'empreinte carbone des panneaux favorise les panneaux couches minces, sans prendre en compte le risque environnemental et sanitaire	13
b. Centrales sur bâtiment : la prise en compte de l'empreinte carbone des panneaux a actuellement peu d'impact sur la sélection des projets.....	14
c. Si le critère carbone est actuellement peu discriminant, l'empreinte carbone des panneaux utilisés par les candidats s'est significativement améliorée depuis son introduction.....	16
<i>IV. Évaluation de trois scénarios de réforme des modalités de soutien À l'Énergie solaire..</i>	18
a. Scénario 1 : prise en compte renforcée de l'empreinte carbone des panneaux.....	18
b. Scénario 2 : prise en compte de la toxicité des panneaux à couches minces.....	20
c. Scénario 3 : prise en compte renforcée de l'empreinte carbone des panneaux et de la toxicité des panneaux à couches minces	21

Synthèse

Bien que largement moins nocive pour le climat que l'électricité issue des centrales à gaz ou charbon, l'électricité produite à partir de panneaux photovoltaïques n'est pas neutre en carbone. La fabrication de ces panneaux nécessite en effet beaucoup d'électricité, ce qui, en fonction du mix électrique du pays de fabrication, peut se traduire par des émissions élevées de gaz à effet de serre. Au kilowattheure d'électricité produite par le panneau photovoltaïque en fonctionnement, l'ensemble des émissions (liées à la production d'électricité et à la fabrication du panneau) s'élèvent en moyenne à 55 gCO₂eq mais avec une fourchette pouvant varier entre 39 et 89 gCO₂eq selon l'ensoleillement, la technologie utilisée et le pays de fabrication des panneaux.¹

La France dispose déjà d'une électricité très peu carbonée. Pour que le développement de l'électricité photovoltaïque contribue à la baisse globale des émissions de gaz à effet de serre, il est essentiel que le soutien public à l'énergie photovoltaïque cible en priorité des panneaux solaires peu carbonés. La Commission de Régulation de l'Énergie (CRE), responsable de la mise en œuvre des appels d'offre du ministère de la Transition écologique (MTE) visant à sélectionner les projets bénéficiant d'un tarif d'achat ou d'un complément de rémunération, sélectionne donc les projets de centrales photovoltaïques en fonction non seulement du prix proposé par l'industriel, mais également, depuis juillet 2011, de l'empreinte carbone des panneaux que celui-ci souhaite installer. L'empreinte carbone des panneaux représente ainsi 20 à 30 % de la note attribuée aux candidats aux appels d'offre du MTE.

Le premier objectif de cette publication est d'évaluer l'impact environnemental de cette politique. Le critère carbone a-t-il contribué à la diminution de l'empreinte carbone des panneaux installés en France ? Pour répondre à cette question, nous avons eu accès aux dossiers des candidats à deux des principaux appels d'offres du MTE, qui permettent à l'État d'attribuer des tarifs d'achat aux centrales au sol et aux centrales sur bâtiment, pour un total de 1950 MWC en 2017 et 2295 MWC en 2018.

Les données confirment la forte dépendance de l'empreinte carbone des panneaux solaires à leur pays de fabrication. Les émissions de carbone liées à la production d'un module photovoltaïque fabriqué en France sont en moyenne 5 à 20 % plus faibles que pour un module importé. D'autres étapes de la chaîne de production (comme la première transformation de l'oxyde de silicium en silicium de grande pureté (silicium solaire), très énergivore) sont encore plus décisives du point de vue des émissions de gaz à effet de serre.

Le critère carbone a favorisé l'installation en France de panneaux utilisant la technologie des couches minces au détriment de la technologie dominante des panneaux au silicium. Le critère carbone aurait conduit à une augmentation du nombre de projets de centrales au sol sélectionnés qui utilisent cette technologie d'environ 20 %. Cette première technologie est très minoritaire au niveau mondial mais dispose d'une part de marché conséquente en France. La technologie des couches minces génère moins d'émissions de gaz à effet de serre, mais implique d'autres problèmes environnementaux liés à la toxicité élevée d'un de ses composants principaux, le cadmium.

Au sein d'une même famille technologique, le critère carbone ne semble aujourd'hui plus très discriminant. Ainsi, pour l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment » où la très grande majorité des projets présentés utilise des panneaux au silicium, les projets sélectionnés seraient, pour 90,6 % d'entre eux, également sélectionnés si le critère carbone n'était pas pris en compte.

Il semble cependant avoir eu un impact dynamique significatif en incitant les acteurs à acheter des panneaux moins carbonés. Au fil du temps, les candidats à ces appels d'offre ont en effet amélioré leurs performances environnementales par de nouvelles stratégies d'approvisionnement, en privilégiant les sous-traitants avec la meilleure empreinte carbone.

¹ *Solar resources and carbon footprint of photovoltaic power in different regions in Europe*, De Wild-Scholten, SmartGreenScans, 2014.

Si aujourd’hui, le critère carbone ne semble plus déterminant c’est parce que ses modalités ne sont plus assez discriminantes. Une évolution du dispositif, pour le rendre plus efficace, semble donc nécessaire. Trois scénarios d’évolution du dispositif ont été évalués: (1) un critère carbone plus discriminant, (2) une prise en compte de la toxicité environnementale des panneaux à couches minces, (3) une combinaison de ces deux premiers scénarios. L’analyse de ces scénarios a en premier lieu été effectuée sous un angle environnemental (impact sur les émissions de gaz à effet de serre et impact environnemental et sanitaire du cadmium) et a ensuite cherché, de manière incidente, à évaluer les conséquences de telles évolutions sur l’industrie française du photovoltaïque. Les scénarios proposés sont volontairement contrastés, et ne constituent pas des propositions de réforme du dispositif « clef en main ».

Rendre plus discriminant le critère carbone conduit à une réduction des émissions de gaz à effet de serre associées à la fabrication des panneaux, mais favorise de façon conséquente les panneaux à couches minces et donc les risques liés à la toxicité et n’a pas d’impact sur les parts de marché des producteurs français (scénario 1). Introduire un critère relatif à la toxicité des panneaux (scénario 2) défavorise la technologie des couches minces et est susceptible de limiter la toxicité mais s’accompagnerait d’une augmentation des émissions des gaz à effet de serre. Les modules fabriqués en France verraient par ailleurs leurs parts de marché augmenter. Si les panneaux à couches minces n’étaient plus éligibles aux appels d’offres en raison de l’introduction d’un critère « toxicité », cela pourrait se traduire par une augmentation du chiffre d’affaires des fabricants français de 100 à 150 millions d’euros par an. Enfin, une combinaison de ces deux politiques (scénario 3) permettrait à la fois de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et de diminuer les coûts sociaux et environnementaux associés à l’utilisation du cadmium. Un tel scénario conduirait à une augmentation des parts de marché des modules fabriqués en France.

Figure 1 : synthèse des avantages et inconvénients des scénarios étudiés

	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	Impact environnemental et sanitaire du cadmium	Parts de marché des modules fabriqués en France
Scénario 1	oui	aggravé	neutre
Scénario 2	non	réduit	positif
Scénario 3	oui	réduit	positif

I. LE SOUTIEN AU PHOTOVOLTAÏQUE BAS-CARBONE

L'essentiel du soutien public à la production d'électricité photovoltaïque en France passe par l'attribution de tarifs d'achat et de compléments de rémunération aux projets de centrales sélectionnés suite aux appels d'offre du ministère de la Transition écologique. Les projets sont sélectionnés en fonction du prix que les développeurs de centrales proposent, mais également de l'empreinte carbone des panneaux solaires utilisés.

a. L'essentiel du soutien public à l'électricité solaire passe par les appels d'offre du MTE

La France dispose historiquement d'un mix énergétique très peu carboné, notamment grâce au nucléaire et à l'hydroélectricité, qui représentaient respectivement 71 % et 11 % de notre production d'électricité en 2019². Dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) de novembre 2018, la France s'est engagée à diversifier son mix électrique en faisant passer la part des énergies renouvelables dans notre mix énergétique de 16 % en 2018 à 27 % en 2023 et 32 % en 2028³.

Dans ce cadre, la production d'énergie solaire photovoltaïque a régulièrement augmenté, en passant de 42 GWh en 2008 à 10 200 GWh en 2018. Le photovoltaïque représentait ainsi 1,9 % de la production d'électricité française en 2018⁴.

Figure 2 : capacité photovoltaïque installée en France

	Capacité installée par an en MWc	Variation en %
2010	688	362
2011	1 706	194
2012	1 143	44
2013	639	17
2014	931	21
2015	899	17
2016	576	9
2017	877	13
2018	873	11
2019	890	10

Source : SDES

Mesurer les capacités de production d'électricité solaire

La production d'énergie se mesure en termes de puissance, souvent exprimée en watt (W), ou de quantité, exprimée en watt-heure (Wh). Un watt-heure correspond à la quantité d'énergie produite par une installation de puissance 1 W fonctionnant pendant une heure. Un kilowatt-heure (kWh) représente 1 000 watt-heures ; un mégawatt-heure, un million ; un gigawatt-heure, un milliard.

Le watt-crête, Wc, est une unité de capacité qui permet d'évaluer le potentiel de production d'énergie d'un panneau solaire. Il s'agit de la puissance produite par le panneau dans des conditions standards d'ensoleillement et de température.

² RTE, Bilan électrique 2019

³ www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe

⁴ www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2020?rubrique=18

Le soutien à la production d'électricité solaire passe par deux politiques principales.

Sur le *marché résidentiel*, un décret fixe un tarif d'achat annuel destiné aux petits projets, de puissance comprise entre 3 et 100 kW. Un particulier souhaitant installer des panneaux photovoltaïques sur son toit peut ainsi demander en préfecture un certificat lui donnant le droit de revendre son électricité à un tarif fixé, sur une durée de 20 ans. Par exemple, en 2017, le prix d'achat était de 60 € par MWh.

Sur le *marché commercial*, c'est-à-dire pour les centrales de production d'électricité de plus de 100 kW, le soutien public passe par les appels d'offres du MTE. Les candidats souhaitant construire une nouvelle centrale déposent un dossier de candidature auprès de la CRE, instance indépendante chargée de la mise en œuvre opérationnelle des appels d'offres. Dans ce dossier, les candidats proposent un prix de vente de leur électricité. Ils détaillent par ailleurs les caractéristiques de leur projet, notamment la technologie utilisée, la provenance de chaque composant du panneau et l'empreinte carbone du panneau. Les projets sont alors classés en fonction de l'empreinte carbone des panneaux, du prix proposé et d'autres critères portant sur les caractéristiques du terrain d'implantation. Les candidats sélectionnés par le MTE bénéficient d'un tarif d'achat au prix proposé, éventuellement ajusté en fonction de l'inflation et d'autres éléments, sur une durée de 20 ans.

b. Ces appels d'offre prennent en compte le contenu carbone des panneaux sous la forme d'une « note carbone »

En plus du prix, les appels d'offres du MTE prennent donc en compte l'empreinte carbone des panneaux solaires comme critère de sélection depuis juillet 2011. Celle-ci correspond aux émissions de gaz à effet de serre causées par la production des différentes composantes du panneau solaire.

L'empreinte carbone des panneaux des candidats aux appels d'offre du MTE est évaluée grâce à une « analyse du cycle de vie » (ACV). Le candidat construit un document technique listant l'ensemble des émissions liées à la fabrication des panneaux solaires utilisés, des matières premières au recyclage des différentes composantes. Ce rapport est envoyé à l'Ademe, qui confirme les valeurs obtenues et émet le cas échéant une attestation. Si le candidat ou le fabricant n'a pas réalisé d'ACV, l'empreinte carbone de la technologie peut être évaluée de manière simplifiée via l'utilisation de coefficients standardisés par composant et par pays d'origine de ces composants. Ces coefficients et la méthode de calcul sont détaillés dans le cahier des charges de l'appel d'offres. Les coefficients correspondent à des bornes hautes, ce qui pénalise fortement les projets qui choisissent de ne pas réaliser d'ACV.

Notons que du fait de leur périmètre, ces évaluations omettent une part importante des émissions de gaz à effet de serre associées au projet. Par exemple, elles ne prennent pas en compte les émissions associées au cadre du panneau (souvent en aluminium) ou à l'installation du panneau dans le sol (utilisation importante de béton).

Les appels d'offres du MTE sont divisés en périodes pendant lesquelles les candidats peuvent envoyer leur dossier. Il y a en moyenne deux à trois périodes par an sur chacun des appels d'offres du MTE. Sur chacune des périodes, un prix plafond (P_{sup} dans la formule ci-dessous) et un prix plancher (P_{inf}) sont précisés. Une « note prix », NP, est calculée sur la base du prix proposé par le candidat (P), de ces deux prix de référence, et de la note maximale possible sur le critère prix (NP_0). De la même façon, la note carbone sera obtenue à partir de l'évaluation carbone simplifiée (ECS), d'une valeur plafond (ECS_{sup}), d'une valeur plancher (ECS_{inf}) et de la note maximale possible sur ce critère (NC_0).

Les deux notes sont ajoutées (avec parfois une troisième note visant à refléter les caractéristiques du terrain d'implantation) et donnent la note finale du projet sur 100. La note prix représente 70 % de la note finale et la note carbone en représente 20 à 30 .

$$NP = NP_0 \times \frac{P_{sup} - P}{P_{sup} - P_{inf}}$$

$$NC = NC_0 \times \left[\frac{ECS_{sup} - ECS}{ECS_{sup} - ECS_{inf}} \right]$$

c. Description des données étudiées

Nous avons étudié les données⁵, des candidats aux deux principaux appels d'offres du MTE en 2017 et 2018 : « Centrales au sol » et « Centrales sur bâtiments, serres et hangars agricoles et ombrières de parking de puissance comprise entre 100 kWc et 8 MWc » (que nous désignerons par la suite par l'appellation « Centrales sur bâtiments »). Les installations de plus de 100 kWc représentaient 72 % de la puissance photovoltaïque nouvellement installée en 2018⁶, ces deux appels d'offres constituent donc une proportion significative des tarifs d'achat et compléments de rémunération attribués par le MTE en 2017 et 2018, et ont suscité 4 053 offres en 2017.

Ces deux appels d'offres sont divisés en familles. Ces familles correspondent à des catégories de centrales, par taille ou par type de projets. La famille 1 de l'appel d'offres « Centrales au sol » est ainsi réservée aux projets de taille très importante, plus de 5 MWc, contre moins de 5 MWc pour la famille 2. La famille 3 de ce même appel d'offres est dédiée aux installations photovoltaïques sur ombrières de parking de puissance comprise entre 500 kWc et 10 MWc. La figure 3 montre les capacités à installer ciblées pour le MTE en 2017 et 2018 pour chacune de ces familles.

Figure 3 : capacités installées par famille de l'appel d'offres

Familles	Spécifications	Capacité cible en MWc		Nombre de candidatures
		2017	2018	2017
Centrales au sol, famille 1	> 5 MWc	900	1 000	238
Centrales au sol, famille 2	500 kWc à 5 MWc	405	430	344
Centrales au sol, famille 3	Parkings, 500 kWc à 10 MWc	195	140	169
Centrales sur bâtiments, famille 1	100 kWc à 500 kWc	225	350	2 838
Centrales sur bâtiments, famille 2	500 kWc à 8 MWc	225	375	464

Nous avons étudié en détail la famille 1 de l'appel d'offres « Centrales au sol » ainsi que les familles 1 et 2 de l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment ». Pour les centrales au sol, nous avons travaillé sur les 4 premières périodes, alors que nous nous sommes concentrés sur les périodes 1 à 5 pour les centrales sur bâtiment. Ces périodes correspondent à des durées différentes, l'année 2017 est ainsi divisée en trois périodes contre deux pour l'année 2018.

Figure 4 : dates des différentes périodes

Périodes	Centrales au sol	Centrales sur bâtiments
1	01/2017 – 02/2017	02/2017 – 03/2017
2	05/2017 – 06/2017	06/2017 – 07/2017
3	11/2017 – 12/2017	10/2017 – 11/2017
4	05/2018 – 06/2018	02/2018 – 03/2018
5	11/2018 – 12/2018	06/2018 – 07/2018
6	05/2019 – 06/2019	10/2018 – 11/2018

II. LA POLLUTION LIÉE À LA FABRICATION DES PANNEAUX SOLAIRES

⁵ Tous les chiffres présentés dans la suite de ce document sont issus de ces données, calculs de l'auteur.

⁶ « Tableau de bord : solaire photovoltaïque », SDES, quatrième trimestre 2018.

Bien que plus propre que l'énergie produite à partir de gaz ou de charbon, l'électricité solaire n'est pas neutre en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Une proportion importante des émissions de carbone liées au photovoltaïque concerne les étapes de fabrication des panneaux, très consommatrice d'électricité. Le contenu carbone de l'électricité photovoltaïque dépend ainsi fortement de la géographie de la chaîne de production des panneaux solaires utilisés. Les modules fabriqués en France bénéficient d'un avantage significatif de ce point de vue car l'électricité, consommée pour la fabrication des panneaux, a un contenu carbone moyen plus faible que dans d'autres pays.

a. La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques est énergivore et peut générer des émissions de gaz à effet de serre importantes

La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques est énergivore et peut entraîner d'importantes émissions de gaz à effet de serre. L'étude de Ito et al. (2007) estimait que la fabrication des panneaux représentait la plus grande part (entre 65 % et 72 %) du contenu carbone des PV en ACV⁷.

Les candidats, français et étrangers, aux appels d'offre du MTE doivent effectuer une *évaluation carbone simplifiée* de leur produit, correspondant à une estimation des émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des modules photovoltaïques qui constituent les panneaux⁸. Le périmètre retenu ne concerne toutefois que certaines étapes de fabrication (le cadre n'est pas pris en compte alors qu'il est souvent en aluminium, métal dont la production peut engendrer d'importantes quantités de gaz à effet de serre selon le contenu carbone de l'électricité utilisée pour le produire) et n'inclut pas le transport des panneaux solaires vers le site d'exploitation, leur fixation au sol (qui peut nécessiter des fondations en béton), leur recyclage, ou la construction et gestion de la centrale.

Dans ce cadre, sur la première période de ces appels d'offres, les candidats ont utilisé des panneaux dont la fabrication avait une empreinte carbone moyenne variant entre 362 et 378 kilogrammes d'équivalent-CO₂ par kilowatt-crête, selon la famille de projets, et avec une grande variabilité entre projets.

Figure 5 : évaluation carbone moyenne des candidats, période 1

En kgCO₂e/kWc

Centrales au sol			Centrales sur bâtiment	
Famille 1	Famille 2	Famille 3	Famille 1	Famille 2
362	378	372	367	371

Ainsi, pour les projets de l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment » (famille 1, période 1), le contenu carbone des étapes de fabrication varient entre 292 et 694 kgCO₂eq/kWc pour une moyenne à 367 kgCO₂eq/kWc (soit 15,0 gCO₂eq/kWh en moyenne, avec des variations entre 9,2 gCO₂eq/kWh et 28,3 gCO₂eq/kWh).

Le contenu carbone de l'électricité française est déjà faible, autour de 62 gCO₂eq/kWh en 2018⁹. Il est donc essentiel pour notre pays de sélectionner des panneaux solaires peu carbonés, afin que le développement des énergies renouvelables permette de poursuivre la décarbonation de notre mix électrique et contribue à la baisse globale des émissions de gaz à effet de serre .

⁷ « A comparative study on cost and life-cycle analysis for 100 MW very large-scale PV systems in deserts using m-Si, a-Si, CdTe and CIS modules », Masakazu Ito et al. (2007)

⁸ Méthodologie complète en annexe 2 de l'appel d'offres « Centrales au sol »

⁹ Contenu de la production d'électricité uniquement, non comprises les émissions de carbone générées lors de la construction des moyens de production ou lors du cycle d'extraction/transformation/ transport des combustibles utilisés (donc pas en cycle de vie), source SDES d'après l'AIE, 2020 www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/chiffres_cles_climat_edition_2021_donnees_associees_0.xlsx

b. Ces émissions dépendent fortement de la provenance des différentes composantes du panneau

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication d'un panneau solaire dépendent beaucoup des pays dans lesquels sont fabriquées ses différentes composantes.

La technologie la plus utilisée est celle des *panneaux solaires cristallins*, monocristallins ou polycristallins. La fabrication de ces panneaux comprend quatre étapes principales. L'industriel doit d'abord fondre du silicium dans des fours à plus de 3 000 degrés pour atteindre une pureté suffisante. Les lingots de silicium ainsi obtenus sont ensuite découpés en fines « galettes », appelées *wafers* en anglais. Ces galettes sont utilisées pour fabriquer des cellules photovoltaïques qui sont enfin assemblées en un module photovoltaïque.

Figure 6 : chaîne de valeur du photovoltaïque cristallin



Ces différentes étapes sont souvent effectuées dans des pays différents. Dans les données que nous avons étudiées, très peu de panneaux sont fabriqués intégralement à un seul endroit. Les deux premières étapes, la fonte du silicium et son découpage en galettes, sont les plus consommatrices d'énergie. Pour une proportion importante des candidats aux appels d'offres du MTE, ces étapes sont réalisées partiellement ou intégralement en Norvège. L'Allemagne et les États-Unis sont également présentes sur le segment de la fonte du silicium et les *wafers* proviennent parfois d'Asie. Les panneaux dont le silicium est produit en Norvège, pays dont l'électricité est presque entièrement décarbonée, ont une empreinte carbone inférieure de 10 % à ceux utilisant du silicium produit en Allemagne, où l'électricité repose fortement sur le charbon et le gaz naturel.

La fabrication des cellules est presque exclusivement réalisée en Asie : Malaisie, Corée du Sud, Thaïlande, Taïwan, Chine. Les modules proviennent souvent du Mexique ou d'Asie. L'assemblage des modules est parfois réalisé sur le sol national : c'est le seul segment de la chaîne de valeur sur lequel la France a conservé des capacités de production. Les industriels français sont pour la plupart spécialisés dans l'assemblage de modules à partir de cellules fabriquées en Asie avec du silicium et des galettes provenant de Norvège.

Une autre technologie, très minoritaire au niveau mondial, est celle des *couches minces*, utilisant principalement du tellure de cadmium. Ces panneaux sont moins chers mais ont un plus faible rendement, ce qui conduit les centrales reposant sur cette technologie à demander un prix plus élevé pour leur électricité. Nous appellerons par la suite cette technologie alternativement « panneaux à couches minces » ou « panneaux au tellure de cadmium ». La part de marché des panneaux utilisant du tellure de cadmium (CdTe) est de 5 % au niveau mondial, mais d'environ 19 % parmi centrales au sol en France. Nous reviendrons plus loin sur les causes et conséquences de cette particularité. Les panneaux utilisant cette technologie installés dans les centrales françaises proviennent d'une unique entreprise, répartissant sa production entre la Malaisie et les États-Unis.

c. Les panneaux solaires fabriqués en France sont plus propres que les panneaux importés

La France est essentiellement présente sur le segment de l'assemblage des modules solaires. Sur ce segment, l'étude des données montre que les panneaux assemblés en France ont une meilleure empreinte carbone que ceux assemblés à l'étranger.

Nous présentons les valeurs moyennes d'évaluation carbone simplifiée des panneaux selon la provenance des modules, pour la première période de l'appel d'offres « Centrales au sol » (*figure 7*). Nous présentons les résultats moyens sur une seule période pour éviter d'introduire dans ces statistiques un biais temporel. Nous observons de fortes disparités : bien que l'étape de

fabrication des modules photovoltaïques en assemblant des cellules soit moins intensive en énergie que la fonte du silicium, le lieu où est réalisée cette étape (c.-à-d la provenance des modules) semble avoir un impact important sur l’empreinte carbone totale du panneau.

Les modules fabriqués en France sont moins émetteurs de GES pour deux raisons. Assembler un module sur le sol français émet moins de CO₂ que le faire à l’étranger, grâce au mix électrique français très peu carboné. Il est également vraisemblable que les acteurs français aient adopté une stratégie d’approvisionnement plus vertueuse sur le plan des émissions de gaz à effet de serre que leurs concurrents étrangers (*voir encadré*).

Figure 7 : première période, candidatures « Centrales sur bâtiment »

Provenance des modules	Évaluation carbone moyenne du panneau (en kgCO ₂ eq kWc) ¹⁰	Écart par rapport à la France (en %)
France	355	-
Allemagne	416	+ 17
Mexique	374	+ 5
République Tchèque	376	+ 6
Asie	389	+ 9

Encadré

Afin de confirmer que les modules fabriqués en France sont moins polluants, nous avons réalisé une *régression* sur les 3 858 dossiers des candidats aux périodes 1 à 5 de l’appel d’offre « Centrales sur bâtiment ».

Cette régression vise à confirmer l’existence d’une relation causale entre une *variable explicative*, la provenance du module, et la *variable expliquée*, l’empreinte carbone des panneaux. Pour chaque candidat, les données fournies par le MTE précisent l’origine des modules de façon textuelle. Nous avons manuellement associé à chaque dossier le pays dans lequel son module, ses cellules, ses galettes et son silicium ont été fabriqués.

Pour éviter les biais statistiques, des *variables de contrôle* ont été ajoutées : la période, la technologie et la capacité installée. Ces contrôles sont importants pour éviter des biais statistiques, notamment le biais courant des « variables omises ». Par exemple, si nous n’intégrons pas la technologie en tant que variable de contrôle, celle-ci pourrait biaiser l’analyse. Les acteurs allemands bénéficient peut-être de parts de marché plus importantes sur une technologie particulière, qui représente par ailleurs un contenu carbone plus faible. Mais au sein de cette famille technologique, les panneaux allemands seront peut-être plus polluants que ceux fabriqués au Mexique. Ce qui nous intéresse, c’est l’impact de la provenance du module sur le contenu carbone pour des projets utilisant des panneaux d’une même technologie, construits à la même date. Nous intégrons également la capacité comme contrôle car celle-ci peut pousser les projets à sélectionner des panneaux ayant certaines caractéristiques technologiques, notamment en termes de rendement.

Nous présentons les coefficients de cette régression (*figure 8*), qui correspondent à une estimation de la relation entre les deux variables, et les écarts-types, qui représentent le niveau de certitude dont nous disposons sur la valeur du coefficient (régression 1).

$$(régression 1) : EmpCarb_i = A*Contrôles_i + B*OrigineModules_i$$

¹⁰ Il s’agit ici de l’évaluation carbone simplifiée moyenne associée à la fabrication de l’ensemble du panneau, pas seulement des émissions associées à l’étape de fabrication du module.

Ceux-ci confirment un impact significatif de la localisation de l'usine ayant réalisé la dernière étape de fabrication des panneaux (l'assemblage des modules) sur l'empreinte carbone de celui-ci. Les valeurs d'écart-type, entre parenthèses, confirment que la différence d'empreinte carbone entre un panneau fabriqué (c'est-à-dire dont les modules ont été assemblés) en France et un panneau fabriqué à l'étranger est statistiquement significative. Les producteurs français réussissent à économiser, par rapport à leurs concurrents allemands, environ 20 kgCO₂eq/kWc à technologie et capacité égales.

Nous avons réalisé, en colonne de droite (régression 2), une seconde régression en intégrant le prix du panneau parmi les variables de contrôle.

$$(régression 2): EmpCarb_i = A * Contrôles_i + B * Prix_i + C * OrigineModules_i$$

Les coefficients sont relativement peu modifiés (Figure 8). Ces résultats montrent qu'à prix, capacité et technologie équivalent, un panneau solaire dont le module est fabriqué en France a une empreinte carbone significativement plus faible qu'un panneau dont le module est allemand, asiatique ou mexicain.

Figure 8 : régression avec contrôles, candidatures « Centrales sur bâtiment »

Provenance des modules	Régression 1	Régression 2
France	- 0,9 (1,8)	-0,4 (1,8)
Allemagne	19,4 (2,7)	19,8 (2,6)
Mexique	10,6 (1,5)	10,9 (1,5)
République Tchèque	27,5 (2,3)	26,6 (2,3)
Asie	46,4 (2,1)	45,3 (2,1)
Contrôle technologie, période, capacité	X	X
Contrôle prix		X
N	3 858	3 858

III. BILAN DU SOUTIEN PUBLIC AU PHOTOVOLTAÏQUE BAS-CARBONE

Une évaluation de l'impact environnemental du critère carbone des appels d'offres du MTE est réalisée.

Nous montrons notamment que son introduction a favorisé les projets utilisant la technologie des panneaux couches minces. Au sein de la famille technologique des panneaux au silicium, nous montrons que le critère carbone a conduit à une amélioration des performances carbone mais qu'il est aujourd'hui très peu discriminant.

Pour des raisons technico-économiques, la répartition technologique (couches minces, silicium) des panneaux diffère selon la famille de l'installation photovoltaïque (au sol, sur bâtiment).

Pour les centrales sur bâtiment où la superficie disponible pour l'installation des panneaux est limitée, il est en effet nécessaire d'avoir des panneaux avec de bons rendements afin de produire suffisamment d'électricité pour rentabiliser l'installation. Les panneaux couches minces ayant un moins bon rendement que les panneaux cristallins, il est donc très rare de voir cette technologie installée en toitures. Pour les centrales au sol, la contrainte n'est pas la même et la technologie couche mince est donc bien plus présente dans les dossiers de candidature aux appels d'offres.

a. **Centrales au sol : la prise en compte de l’empreinte carbone des panneaux favorise les panneaux couches minces, sans prendre en compte le risque environnemental et sanitaire que ceux-ci représentent**

Contrairement à l’appel d’offres « Centrales sur bâtiments » (*voir infra*), le score carbone joue un rôle clé dans l’appel d’offres « Centrales au sol » et confère aux panneaux utilisant la technologie des couches minces un avantage concurrentiel.

Ci-dessous, des statistiques descriptives des trois technologies principales sont présentées. Ces statistiques ont été réalisées sur les projets sélectionnés au titre de la famille 1 de l’appel d’offres « Centrales au sol »¹¹.

Figure 9 : statistiques descriptives concernant les lauréats, famille 1

	Rendement nominal en %	Prix moyen en €/MWh	Empreinte carbone moyenne en kg CO ₂ eq/kWc
Polysilicium	18,6	56,5	480
Monosilicium	19,5 %	54,7	339
Couches minces	17,1 %	58,2	300

Parmi les projets sélectionnés dans cet appel d’offres, on constate que l’empreinte carbone des panneaux couche minces est bien moins élevée que pour les panneaux polysilicium et monosilicium. En effet, la fabrication des panneaux couches minces est moins énergivore que celle des panneaux cristallins. En contrepartie, les centrales utilisant ces panneaux sont moins performantes en termes de rendement et de compétitivité-prix.

Sur les trois familles de l’appel d’offres « Centrales au sol », les panneaux couches minces sont utilisés dans 18,4 % des projets acceptés pendant les périodes 1 à 6¹², contre 54,9 % pour le silicium monocristallin et 26,7 % pour le silicium polycristallin¹³. Au niveau mondial, les panneaux au tellure de cadmium ne représentent que 5 % de part de marché environ.

Ces parts de marché très élevées par rapport à la moyenne mondiale sont en grande partie expliquées par le critère carbone des appels d’offres. Dans la plupart des périodes de l’appel d’offres, les candidats de la famille 1 utilisant des panneaux à couches minces bénéficient d’un avantage conséquent sur le critère carbone par rapport à leurs concurrents utilisant des panneaux au silicium. Cet avantage sur leur note est en moyenne, parmi les projets acceptés, de deux à quatre points par rapport aux projets utilisant du silicium monocristallin, et de quatre à cinq points par rapport à ceux utilisant du silicium polycristallin.

¹¹ Ces statistiques sont réalisées sur la famille 1 de l’appel d’offres afin de ne pas introduire de biais lié à la sous-représentation des panneaux à couches minces au sein des familles 2 et 3. En effet, ces panneaux ont un plus faible rendement qui les rend moins pertinents pour de petites installations. Les petites installations étant par ailleurs plus chères, une moyenne sur les trois familles aurait intégré un biais important.

¹² Sur l’ensemble de la puissance installée depuis le début des appels d’offres, la technologie couches minces représente 14 %.

¹³ Pour la seule famille 1, qui concerne des très grandes centrales, les parts de marché respectives sont de 24 % (couches minces), 41 % (mono) et 35 % (poly).

Figure 10 : note carbone moyenne, projets acceptés, famille 1

Période	2	3	4	5	6
Polysilicium	9,6	13,1	15,7	13,4	11,6
Monosilicium	12,2	14	14,9	13,4	13,7
Couches minces	14	14	15,1	17,2	16,7

Cet avantage sur la note carbone permet aux candidats utilisant des panneaux couches minces de proposer, à note finale équivalente, un prix élevé : par exemple, sur la période 5, un candidat souhaitant obtenir une note totale de 80/100 pourrait proposer un prix plus élevé de 3 à 4 % s'il utilisait des couches minces à la place de panneaux au silicium.

Pour évaluer l'impact du critère carbone sur la part de marché du tellure de cadmium, nous avons réalisé une simulation où nous avons répliqué la méthodologie utilisée par la CRE pour sélectionner les projets, mais en ne les classant qu'en fonction du prix, sans prendre en compte leur empreinte carbone. Sur ces appels d'offres « théoriques », les résultats changeraient de façon sensible, comme le montre le tableau ci-dessous donnant le nombre de projets utilisant la technologie des couches minces sélectionnés avec et sans le critère carbone. Sans ce dernier, le nombre de projets retenus utilisant les couches minces aurait été inférieur de 20 % (25 projets au lieu de 30)¹⁴. L'effet peut surtout être observé sur l'appel d'offres de la période 1, qui a sélectionné 24 projets sur 140 réponses (40 %), alors que les appels d'offres des périodes suivantes ont de fait été moins sélectifs (plus de 80 % des projets retenus *in fine*), ce qui explique que les projets couches minces restent sélectionnés même sans critère carbone dans la simulation.

Figure 11 : Famille 1, centrales au sol

Période	1	2	3	4
Nombre de projets acceptés, couches minces en prenant en compte le critère carbone	10	13	2	5
Nombre de projets acceptés, couches minces sans prendre en compte le critère carbone	5	14	2	4

Le critère carbone procure un avantage de deux à quatre points aux porteurs de ces projets. Ils peuvent ainsi rester compétitifs (même note finale) malgré un prix plus élevé (de 3 à 4 %) lié au moindre rendement de la technologie couches minces.

En favorisant les panneaux couches minces, le critère carbone remplit son objectif. Cependant, cette technologie comporte du cadmium, un métal dont la toxicité pour l'environnement et la santé humaine est importante. Cette substance fait l'objet d'une interdiction d'utilisation sur le sol européen dans le cadre de la directive RoHS (*Restriction of hazardous substances in electrical and electronic equipment*) mais une exemption a été accordée pour le cadmium contenu dans les panneaux photovoltaïques.

b. Centrales sur bâtiment : la prise en compte de l'empreinte carbone des panneaux a actuellement peu d'impact sur la sélection des projets

Hormis le cas des panneaux couches minces, la prise en compte de l'empreinte carbone des panneaux a actuellement peu d'impact sur la sélection des projets.

Pour l'ensemble des périodes de la famille 1 de l'appel d'offre « Centrales sur bâtiment », nous avons réalisé la même expérience que précédemment. Nous avons simulé le résultat de la sélection du MTE si le critère carbone n'avait pas été pris en compte.

¹⁴ Il s'agit d'un majorant car, en l'absence de critère carbone, les offres utilisant les couches minces auraient peut-être été différentes en prix également pour rester compétitives.

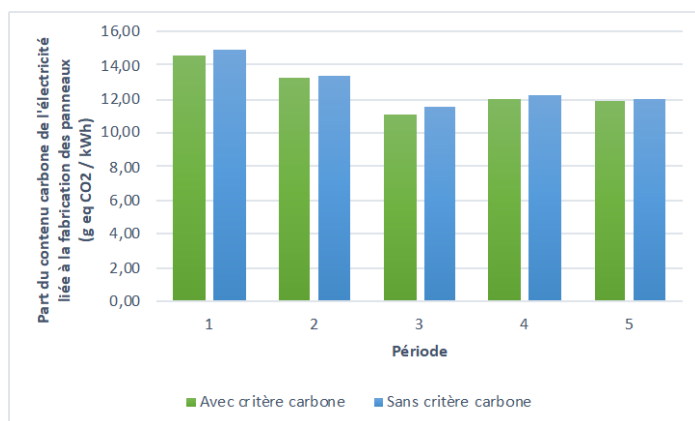
Un premier constat s'impose : les projets sélectionnés sont sensiblement les mêmes. Selon les périodes, 88 % à 100 % des projets sélectionnés aujourd'hui auraient également été sélectionnés si le critère carbone n'existait pas.

Figure 12 : projets sélectionnés à la fois avec et sans critère carbone

Période	1	2	3	4	5
Projets communs en %	91,2	93,7	88,7	92,6	99,4

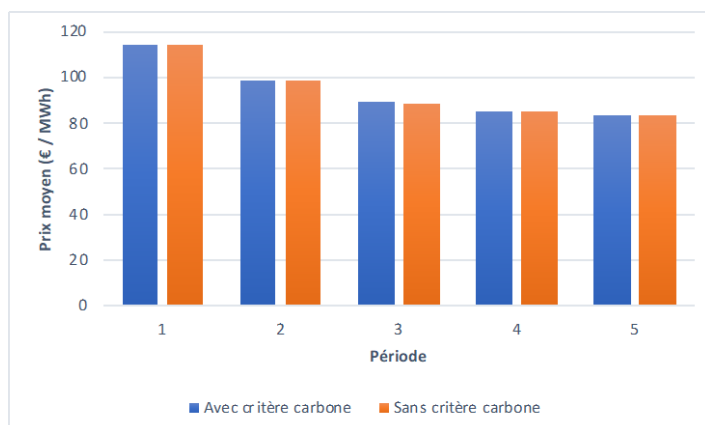
Sélectionner les projets uniquement en fonction de leur prix augmenterait le bilan carbone moyen des panneaux de seulement 0,1 % à 3 % selon la période. Nous avons évalué l'impact en termes de contenu carbone de l'électricité produite sous plusieurs hypothèses. En prenant une durée de vie de 20 ans et en considérant qu'il n'y a pas de dégradation de la quantité d'énergie produite par le panneau au cours du temps, on obtient une différence de 0,01 à 0,5 gramme équivalent carbone par kWh.

Figure 13 : impact du critère carbone actuel sur le contenu carbone de l'électricité photovoltaïque



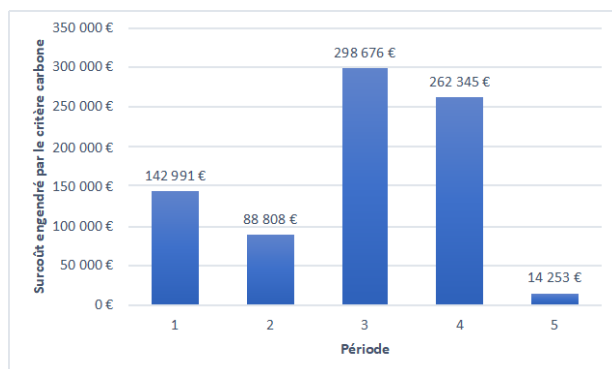
L'impact du critère carbone sur le prix de l'électricité des projets sélectionnés est également très limité. Les différences de prix entre la méthodologie actuelle et les projets sélectionnés sans critère carbone n'est que de quelques centimes. Pour chaque période, il existe une différence de moins de 0,15 % entre les prix moyens associés aux deux méthodologies de sélection.

Figure 14 : impact du critère carbone actuel sur le prix moyen des projets



Le surcoût total engendré par la note carbone est ainsi relativement faible. Pour les projets sélectionnés en 2017 et 2018 au sein de la famille 1 de l'appel d'offre « Centrales sur bâtiment », il ne s'élève qu'à quelques centaines de milliers d'euros au total sur les périodes 1 à 5. Ce montant peut sembler important, mais il est payé par le contribuable sur 20 ans. Il reste négligeable rapporté aux milliards d'euros annuels qui constituent le soutien public au photovoltaïque.

Figure 15 : Surcoût engendré par le critère carbone



Méthode

Nous avons deux groupes de projets, l'un sélectionné avec la méthodologie actuelle, l'autre sélectionné uniquement en fonction du prix proposé, sans prendre en compte le critère carbone. Nous souhaitions identifier la différence de coût pour l'État entre ces deux groupes de projet.

Le coût pour l'État est étalé sur 20 ans, et vaut chaque année :

$$(\text{tarif d'achat} - \text{prix de marché}) * (\text{quantité d'énergie})$$

Nous avons projeté cette valeur sur 20 ans pour chacun des projets des deux groupes. La quantité totale d'énergie produite n'était pas exactement la même. La différence s'explique par des « facteurs de charge » (quantité d'énergie produite en fonction de la capacité) différents selon la géographie des projets, qui a une influence importante sur l'ensoleillement de la centrale. Nous avons donc rapporté le coût total du groupe sélectionné sans critère carbone à la même quantité d'énergie que celle produite par les projets financés avec la méthodologie actuelle en appliquant une règle de trois.

Nous avons fait plusieurs hypothèses par souci de lisibilité :

- (1) Cette quantité devrait être mise à jour pour ramener ces engagements futurs à leur valeur actuelle. Nous ne prenons pas en compte cette actualisation des revenus futurs.
- (2) Le prix d'achat est indexé sur un indice composite captant la hausse des prix (salaires horaires et indice des prix à la production de l'industrie française). Nous ne prenons pas en compte cette évolution en fonction de l'inflation.
- (3) Nous n'avons pas pris en compte la dégradation de la quantité d'énergie produite par les panneaux solaires.

c. Si le critère carbone est actuellement peu discriminant, l'empreinte carbone des panneaux utilisés par les candidats s'est significativement améliorée depuis son introduction

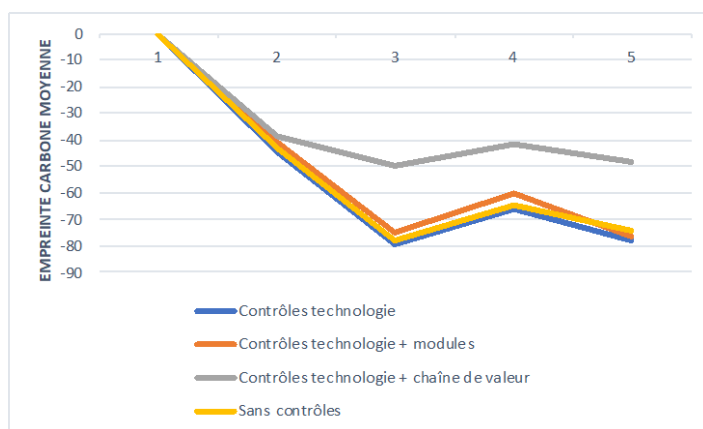
Ce résultat doit toutefois être nuancé : l'empreinte carbone des candidats s'est fortement améliorée depuis 2017. Le faible impact du critère carbone sur la sélection des projets est peut-être une bonne nouvelle : ce critère n'est certes plus très discriminant, mais c'est parce que la plupart des candidats ont amélioré leurs performances environnementales.

D'une période sur l'autre, on remarque en effet une forte baisse de l'empreinte carbone moyenne des candidats. La courbe en jaune ci-dessous montre l'évolution de celle-ci, au sein de la famille 1 de l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment ». La courbe bleue montre l'évolution de l'empreinte carbone des modules utilisés par ces candidats, mais à technologie constante. Le fait que cette courbe évolue de la même façon que la première montre que l'effet constaté ne correspond pas uniquement à un choix technologique des candidats de favoriser le silicium monocristallin ou polycristallin, ce qui pourrait être complètement indépendant du critère carbone et lié au contexte technologique de la filière.

En orange, nous avons tracé la même courbe, mais en gardant constantes à la fois la technologie et la provenance des modules. L'évolution très similaire de ces trois courbes montre que l'amélioration des performances des panneaux n'est pas liée qu'à un changement de fournisseurs pour les modules non plus. L'écart avec la 4^e courbe, en gris, qui représente l'empreinte carbone moyenne à technologie et géographie constantes pour l'ensemble des étapes de production, suggère que l'amélioration peut être en partie liée à un changement de fournisseurs pour les cellules, les galettes et le silicium utilisés dans les modules.

Deux effets sont donc responsables de l'essentiel de cette amélioration de la performance carbone des projets. D'une part, les usines impliquées dans la fabrication des composants des panneaux ont amélioré leur efficacité énergétique. Plusieurs acteurs industriels ont communiqué sur des innovations de leur procédé de fabrication destinées à améliorer les performances environnementales de leurs panneaux. D'autre part, les fabricants de panneaux solaires ont amélioré leur stratégie d'approvisionnement, notamment en sélectionnant du silicium et des galettes provenant de pays dont le mix électrique est très peu carboné.

Figure 16 : évolution de l'empreinte carbone des candidats à la famille 1 de l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment » au cours du temps (en abscisses, les différentes périodes de ces appels d'offres)



Méthode

Nous avons utilisé les données de l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment ». La courbe sans contrôle correspond à l'empreinte carbone moyenne par période. Les trois autres courbes correspondent (1) en orange, à l'empreinte carbone moyenne après contrôles vis-à-vis de la technologie, de la capacité et du rendement des projets, (2) en gris, à l'empreinte carbone moyenne après contrôles vis-à-vis des mêmes éléments ainsi que de la provenance des modules, et (3) en bleu, à l'empreinte carbone moyenne après contrôles vis-à-vis des mêmes éléments ainsi que de la provenance de l'ensemble des composants du panneau.

Les valeurs rapportées correspondent donc aux coefficients A, A' et A'' des régressions suivantes :

$$(1) \text{ EmpreinteCarbone}_i = A * \text{Période}_i + B * \text{Contrôles}_i$$

$$(2) \text{ EmpreinteCarbone}_i = A' * \text{Période}_i + B' * \text{Contrôles}_i + C' * \text{OrigineModules}_i$$

$$(3) \text{ EmpreinteCarbone}_i = A'' * \text{Période}_i + B'' * \text{Contrôles}_i + C'' * \text{OrigineComp}_i$$

Ce dernier constat est confirmé par des entretiens menés par le CGDD auprès d'acteurs industriels de la filière solaire dans le cadre du plan de programmation des ressources stratégiques pour la transition bas-carbone. Certains acteurs ont accepté de dévoiler au groupe de travail leur stratégie d'approvisionnement, dont l'objectif explicite était la réduction de l'empreinte carbone des panneaux. Cette stratégie conduisait notamment à commander du silicium norvégien ; la tendance des acteurs à utiliser du silicium fabriqué en Norvège se retrouve en effet dans les données des candidats. Ces stratégies d'approvisionnement sont assez spécifiques aux centrales installées en France. Les entretiens menés auprès des développeurs de centrales sur le sol français confirment qu'ils ont pu être influencés par le critère carbone.

Si aujourd'hui, le critère carbone ne semble plus déterminant, c'est parce que ses modalités ne sont plus assez discriminantes. Une évolution du dispositif, pour le rendre plus efficace sur le plan environnemental, pourrait donc être envisagée et est présentée dans la partie IV.

IV. ÉVALUATION DE TROIS SCÉNARIOS DE RÉFORME DES MODALITÉS DE SOUTIEN À L'ÉNERGIE SOLAIRE

Trois scénarios d'évolution du critère carbone des appels d'offres du MTE sont étudiés. Ils sont volontairement contrastés pour illustrer les conséquences possibles en cas d'évolution du dispositif, qui seront nécessairement plus nuancées.

Le premier scénario (IV.a) consiste à renforcer la prise en compte de l'empreinte carbone des panneaux, par exemple en diminuant la borne supérieure (ECSsup) utilisée pour calculer la note carbone à partir de l'évaluation carbone simplifiée des candidats (I.b). Le deuxième scénario consiste à laisser la note carbone inchangée, mais à prendre en compte la toxicité dans le cadre de l'évaluation des projets (IV.b). Le troisième scénario consiste à coupler les deux évolutions précédentes.

Pour chaque scénario, les conséquences environnementales sont évaluées ainsi que de manière incidente les éventuels effets sur les parts de marché des industriels français.

Nous montrons notamment que sans prise en compte des externalités environnementales associées aux panneaux à couches minces, un critère carbone plus discriminant pourrait conduire à une forte hausse des nuisances liées à l'utilisation du cadmium et n'aurait pas d'impact sur les parts de marché des industriels français. Une combinaison de ces deux politiques pourrait avoir un impact positif sur les émissions de gaz à effet de serre, les externalités associées au cadmium et le développement de l'industrie photovoltaïque française.

a. Scénario 1 : prise en compte renforcée de l'empreinte carbone des panneaux

Figure 17 : empreinte carbone moyenne des candidats, famille 2 de l'appel d'offres « Centrales sur bâtiment »

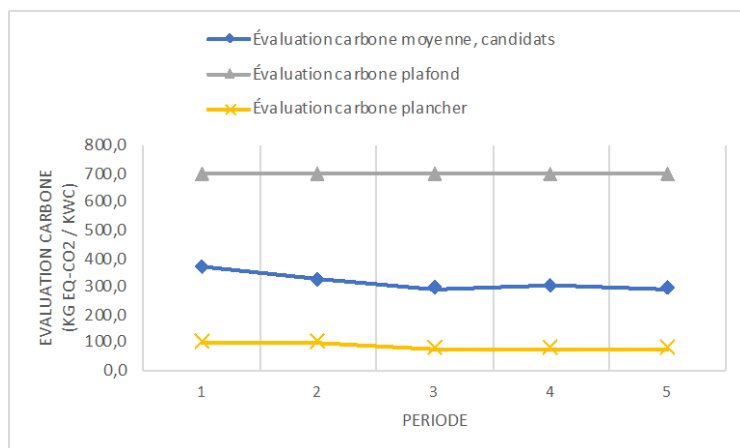


Figure 18 : centrales sur bâtiments, famille 1

Période	1	2	3	4	5
Nombre de points entre le meilleur projet et le moins bon, note carbone	6,5	6,0	5,3	6,0	6,0
Nombre de points entre le meilleur projet et le moins bon, note prix	35,0	40,9	45,9	52,5	63,4

Une modification de la formule de calcul du critère carbone, ramenant sa valeur plafond de 700 à 400 ou 500 kg CO₂eq/kWc, permettrait de le rendre plus discriminant. Une autre possibilité serait d'ajuster les valeurs plancher et plafond de l'empreinte carbone des candidats de façon dynamique, par exemple en prenant l'empreinte carbone la plus élevée de la période *N* comme empreinte carbone plafond de la période *N+1*. Une telle politique aurait des conséquences positives sur les émissions de gaz à effet de serre, mais aurait également un impact sur les finances publiques et l'emploi en France.

Afin d'estimer ces conséquences, nous avons tenté d'évaluer l'impact du cas extrême dans lequel nous donnerions un poids tellement fort au critère carbone que les panneaux ne seraient sélectionnés qu'en fonction de ce critère. Cette étude est bien entendu théorique, mais permet de nous donner une idée de l'impact que pourrait avoir un critère carbone réellement discriminant.

Commençons par l'impact en termes d'émission de gaz à effet de serre. Ne sélectionner que les meilleurs projets en termes d'empreinte carbone permettrait de diminuer significativement les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des panneaux solaires. Nous avons comparé l'empreinte carbone actuelle, pour chaque période, avec celle qu'aurait eu un classement basé uniquement sur le critère carbone. Une telle politique permettrait de réduire les émissions de gaz à effets de serre de 7 % sur les périodes 1 à 5, avec des valeurs allant jusqu'à 10,7 % en période 3. Un critère carbone plus discriminant pourrait donc avoir un impact significatif sur les émissions de gaz à effet de serre.

Figure 19 : centrales sur bâtiment, famille 1

Période	1	2	3	4	5
Diminution de l'empreinte carbone par rapport au classement actuel en %	8,3	10,8	6,5	9,1	2,3

Un critère carbone plus discriminant favoriserait de façon significative les panneaux à couches minces. Sur les périodes 1 à 4 de l'appel d'offres « Centrales au sol », le nombre de projets sélectionnés utilisant des couches minces passerait de 30 à 48, soit une hausse de 60 %. Cette hausse est particulièrement importante en période 1, où le nombre de projets sélectionnés utilisant cette technologie passe de 10 à 24.

Figure 20 : centrales au sol, famille 1

Période	1	2	3	4
Augmentation du nombre de projets sélectionnés utilisant des panneaux à couches minces, centrales au sol en %	+ 140	+ 8	0	+ 60

Une telle politique aurait des conséquences contrastées sur les parts de marché de l'industrie française et sur l'emploi. Comme nous l'avons vu en II.c, les modules photovoltaïques au silicium assemblés en France ont une meilleure empreinte carbone que ceux des producteurs étrangers. Cependant, un critère carbone discriminant favoriserait très fortement les panneaux couches minces, technologie sur laquelle les industriels français ne sont pas positionnés et qui permet d'obtenir de bonnes notes sur le critère carbone.

Donner la priorité au photovoltaïque bas-carbone améliorerait donc les ventes des producteurs nationaux pour les « Centrales sur bâtiment », mais les diminuerait de façon significative pour les « Centrales au sol ». L'impact sur l'emploi industriel en France serait difficile à déterminer, probablement négatif.

Figure 21 : nombre de projets sélectionnés utilisant des modules *made in France*

	Bâtiment Famille 1	Bâtiment Famille 2	Sol Famille 1
Impact sur le nombre de projets sélectionnés utilisant des modules fabriqués en France, (en pourcentage de sa valeur actuelle)	+ 14.9	+ 8	- 27

b. Scénario 2 : prise en compte de la toxicité des panneaux à couches minces

Les panneaux au tellurure de cadmium ont un bilan carbone favorable, mais leur production et leur recyclage impliquent un risque environnemental et sanitaire important du fait de la toxicité élevée du cadmium (métal cancérigène). Il pourrait donc être souhaitable du point de vue environnemental et social de prendre en compte ces externalités dans le cadre de la sélection des panneaux.

Une interdiction des panneaux utilisant du cadmium permettrait de limiter au maximum le coût sanitaire associé au déploiement de ces panneaux. Une approche consisterait à transformer la notation carbone en une notation environnementale intégrant cette dimension. La notation environnementale des projets pourrait ainsi définir un « compromis » entre émissions de carbone et utilisation du cadmium, en trouvant une équivalence : on pourrait par exemple estimer que le déploiement d'un kilowatt-crête de panneaux au tellurure de cadmium a les mêmes conséquences environnementales et sociales que l'émission de 100 à 200 kilogrammes de carbone, et intégrer cet « équivalent-carbone du cadmium » dans les notes des projets.

Nous avons simulé plus simplement l'impact d'une politique extrême « théorique » consistant à exclure les projets utilisant des panneaux au cadmium au titre de leurs impacts sanitaires et environnementaux (rappelons que cette substance est normalement interdite sur le sol européen en vertu de la directive RoHS).

Dans le cadre des centrales au sol, cette exclusion aurait un impact industriel important : le nombre de centrales au sol de plus de 5 MWc utilisant des panneaux français pourrait augmenter de 62 % suite à une éviction complète des panneaux au tellurure de cadmium. Une telle politique aurait augmenté la capacité installée utilisant des modules *Made in France* dans le cadre des projets financés sur les périodes 1 à 4 d'une moyenne de 50 MWc par période. Cela représente une demande annuelle de 100 à 150 MWc supplémentaire. Sur une base de 1€/Wc¹⁵, ce scénario pourrait représenter 100 à 150 millions d'euros de chiffre d'affaire pour les fabricants français de modules photovoltaïques.

Figure 22 : nombre de projets sélectionnés utilisant des modules *Made in France*

Période	1	2	3	4	Total
Impact sur le nombre de projets sélectionnés utilisant des modules fabriqués en France en pourcentage de sa valeur actuelle, famille 1, AO « Centrales au sol »	+ 133	+ 250	0	+ 7	+ 62 (+ 199 MWc ¹⁶)

¹⁵ mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/cout-installation-photovoltaïque.html

¹⁶ Estimation réalisée sur la base d'une règle de 3 entre la capacité totale installée et le % de projets utilisant des modules fabriqués en France dans les deux scénarios.

c. Scénario 3 : prise en compte renforcée de l’empreinte carbone des panneaux et de la toxicité des panneaux à couches minces

Une troisième option consisterait à coupler ces deux idées : prendre en compte les externalités négatives associées au cadmium tout en rendant le critère carbone plus discriminant.

Ce dispositif permettrait de contrôler l’ensemble des externalités liées au développement du photovoltaïque. Nous avons simulé l’effet qu’aurait sur la famille 1 de l’appel d’offres « Centrales au Sol » une éviction complète des panneaux aux couches minces couplée à une sélection des projets uniquement en fonction de l’empreinte carbone des panneaux utilisés.

Remarquons premièrement que malgré l’avantage dont disposaient les panneaux aux couches minces du point de vue de leur empreinte carbone, cette politique conduit tout de même à une diminution importante de l’empreinte carbone totale des panneaux installés.

En effet, les émissions de gaz à effet de serre diminuent sur chaque période, excepté en période 1 (tableau 24). Le poids plus important donné au critère carbone compense ainsi l’éviction des panneaux aux couches minces. Ces résultats sont indicatifs, et sont très approximatifs pour les périodes 2 et 4 sur lesquelles le nombre de candidats était très faible et un redressement des résultats¹⁷ a dû être réalisé.

Figure 23 : impact sur l’empreinte carbone des projets sélectionnés, famille 1, centrales au sol, scénario 3

Périodes	1	2	3	4	Total
Impact du scénario 3 sur l’empreinte carbone des panneaux installés (en % de leur valeur actuelle)	+ 6,8	- 26,2	- 3,1	- 0,8	- 5,5

Sur l’ensemble des centrales installées, centrales au sol mais aussi centrales sur bâtiment, ce scénario conduit à une diminution moyenne de l’empreinte carbone des panneaux installés de 5,5 à 7,3 % selon les appels d’offres. Au total, on assiste dans ce scénario à une diminution de l’empreinte carbone des panneaux installés de l’ordre de 6 %.

Figure 24 : impact sur l’empreinte carbone des projets sélectionnés, scénario 3

Appel d’offres	Centrales au sol, Famille 1, Périodes 1 à 4	Centrales sur bâtiment, Famille 1, Périodes 1 à 5	Centrales sur bâtiment, Famille 2, Périodes 1 à 4	Total
Bilan carbone supplémentaire en %	- 5,5	- 7,3	- 6,6	- 6,0

Contrairement au scénario 1, les conséquences pour l’emploi et l’industrie française sont bien plus nettes. En effet, dans le scénario 1, un critère carbone plus discriminant avait pour conséquence une augmentation des parts de marché des industriels français pour l’appel d’offres « Centrales sur bâtiment » et une diminution des parts de marché pour l’appel d’offres « Centrales au sol » au profit des panneaux au tellurure de cadmium. Une éviction des panneaux couches minces couplée à un critère carbone plus discriminant conduirait donc logiquement à une augmentation des parts de marché des industriels français sur l’ensemble des familles étudiées.

¹⁷ Lorsque la puissance sélectionnée suite à un classement sans panneaux à couches minces devenait inférieure à la puissance cible de l’appel d’offres, nous avons ramené la quantité d’énergie, les émissions de carbone et les autres grandeurs pertinentes à la même capacité par une règle de trois.

Figure 25 : nombre de projets sélectionnés utilisant des modules français

	Bâtiment Famille 1	Bâtiment Famille 2	Sol Famille 1
Impact sur le nombre de projets sélectionnés utilisant des modules fabriqués en France, en pourcentage de sa valeur actuelle	+ 24	+s 19	+ 86

Le tableau ci-dessous synthétise ainsi l'impact qu'aurait chacun de ces scénarios d'évolution du critère carbone sur les externalités environnementales associées aux émissions de gaz à effet de serre et à l'utilisation du cadmium, ainsi que sur l'industrie photovoltaïque française.

Figure 26 : synthèse des avantages et inconvénients des scénarios étudiés

	Réduction des émissions de gaz à effet de serre	Impact environnemental et sanitaire du cadmium	Parts de marché des modules fabriqués en France
Scénario 1	oui	aggravé	neutre
Scénario 2	non	réduit	positif
Scénario 3	oui	réduit	positif



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

**Commissariat général
au développement durable**

Service de l'économie verte et solidaire

Sous-direction de l'économie et de l'évaluation

Tour Séquoia – 92055 La Défense cedex

Courriel : diffusion.cgdd@developpement-durable.gouv.fr

www.ecologie.gouv.fr