



HAL
open science

Recréer une filière photovoltaïque en Europe : un enjeu industriel, énergétique et écologique

Aurélien Boronat, Nadine Levratto

► To cite this version:

Aurélien Boronat, Nadine Levratto. Recréer une filière photovoltaïque en Europe : un enjeu industriel, énergétique et écologique. 2022. halshs-03882541

HAL Id: halshs-03882541

<https://shs.hal.science/halshs-03882541v1>

Submitted on 2 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Recréer une filière photovoltaïque en Europe : un enjeu industriel, énergétique et écologique

Aurélien Boronat

Normalien-étudiant à l'ENS de Rennes
boronataurelien@gmail.com

Nadine Levratto

Directrice de recherche au CNRS, EconomiX
nadine.levratto@cnrs.fr

Résumé :

Alors que les tarifs de l'énergie sont au plus haut, que les objectifs de transition écologique sont affirmés avec force au plan européen et que le plan de relance français met l'accent sur la décarbonation et la transformation du bouquet énergétique français, il est important de s'interroger sur le devenir de la filière photovoltaïque dont les enjeux et les retombées sont très largement appréciables à l'échelle locale. A partir d'une analyse de l'état du secteur et du marché, cette note propose des pistes de réflexion et d'action pour ramener les acteurs de fabrication des panneaux et modules photovoltaïque en Europe. Cette « réindustrialisation » s'appuie sur des outils de politique industrielle existants ou à adapter au lieu de mettre l'accent uniquement sur les subventions à l'installation dont l'une des principales conséquences a été d'augmenter la dépendance à l'égard des producteurs chinois.

Mots clés : photovoltaïque, politique industrielle, filière, instruments européens

L'industrie européenne, qui faisait déjà face à une désindustrialisation latente (Rowthorn et Ramaswamy, 1997 ; Nickell, Redding, Swaffield, 2008)¹, doit simultanément affronter une déstabilisation des chaînes mondiales d'approvisionnement due aux confinements successifs et à une crise énergétique, aggravée par la guerre en Ukraine. Ces événements se conjuguent et renforcent une inflation déjà exceptionnellement forte² sur les marchés de l'énergie (Ouraga, 2016 ; Albert, 2020) et des matières premières liées au secteur (Bonnet et al., 2022). À cela s'ajoute l'impératif de transition énergétique et environnementale, défi structurel et toujours à relever pour l'industrie. Parmi les différentes orientations des politiques publiques pour relever ces enjeux, la réindustrialisation de tout ou partie des chaînes de valeurs de secteurs stratégiques semble désormais une solution sérieusement considérée (Commission Européenne, 2020 et 2021). Parmi ces secteurs stratégiques concernés par cette démarche, cette note se concentre sur le photovoltaïque, filière particulièrement adaptée pour répondre à cette double crise (Commission Européenne 2022). L'énergie solaire est, de plus, un élément clé du scénario de l'AIE qui prévoit des émissions mondiales nettes nulles d'ici 2050 grâce à cette source d'énergie qui devrait représenter 33 % de la production mondiale d'électricité d'ici là.

¹ Considéré comme un phénomène naturel dans les économies développées

² De 2020 à 2021 l'inflation sur l'énergie était de 12,6% dans l'UE selon la Base de données de l'OCDE, <https://data.oecd.org/fr/price/inflation-ipc.htm#indicator-chart> [consulté le 1^{er} juin 2022].

Une filière photovoltaïque dominée par la Chine

Le secteur du photovoltaïque est nettement dominé par les entreprises chinoises qui fournissent 70% de la production des modules (Le BorGn', 2012, Ministère de la transition écologique, 2020, China Photovoltaic Industry Association, 2021). Cette domination s'exerce sur les huit étapes du processus de production présentés dans le Tableau 1 (Du Fayet de la Tour, 2012 ; Yi, 2016), à savoir l'extraction et la transformation du silicium en cristaux³ et d'autres matières premières comme le gallium ou le germanium (étape 1), la production de lingots et de plaquettes (étapes 2 et 3) nécessaires pour produire des cellules photovoltaïques (étape 4), l'assemblage de modules photovoltaïques (étape 5), l'intégration d'un système photovoltaïque avec des câbles, des convertisseurs et des batteries (étape 6), et l'installation des modules photovoltaïques (étapes 7), et le recyclage de ces modules (étapes 8).

Tableau 1 – Parts de marché chinoises sur les différents segments de la filière photovoltaïque, 2020-2021

Etapes de production	Parts de marché chinoises	Nombre de firmes chinoises dans le Top 10	Sources
Production du silicium	68%	N/A	Ministère de la transition écologique, 2020
Transformation en polysilicium	45% à 63%	6	Ministère de la transition écologique, 2020, Bernreuter Research 2021,
Production et transformation : Gallium Indium Lithium Terres rares lourdes et légères	80% 48% 39% 86%	N/A	Commission Européenne, 2020
Lingots	95%	N/A	CEA, Liten/DTS/FB, China Photovoltaic Industry Association, Ministère de la transition écologique, 2020
Plaquettes	90%	9 ⁴	CEA, Liten/DTS/FB, China Photovoltaic Industry Association, Ministère de la transition écologique, 2020
Cellules photovoltaïques	79%	7	CEA, Liten/DTS/FB, China Photovoltaic Industry Association, 2021
Modules photovoltaïques	70% à 73% ⁵	8	China Photovoltaic Industry Association, 2021

³ Dans cette recherche on se concentrera principalement sur des modules cristallins (polycristallin ou monocristallin). Ce type de modules représente la grande majorité des panneaux installés dans le monde.

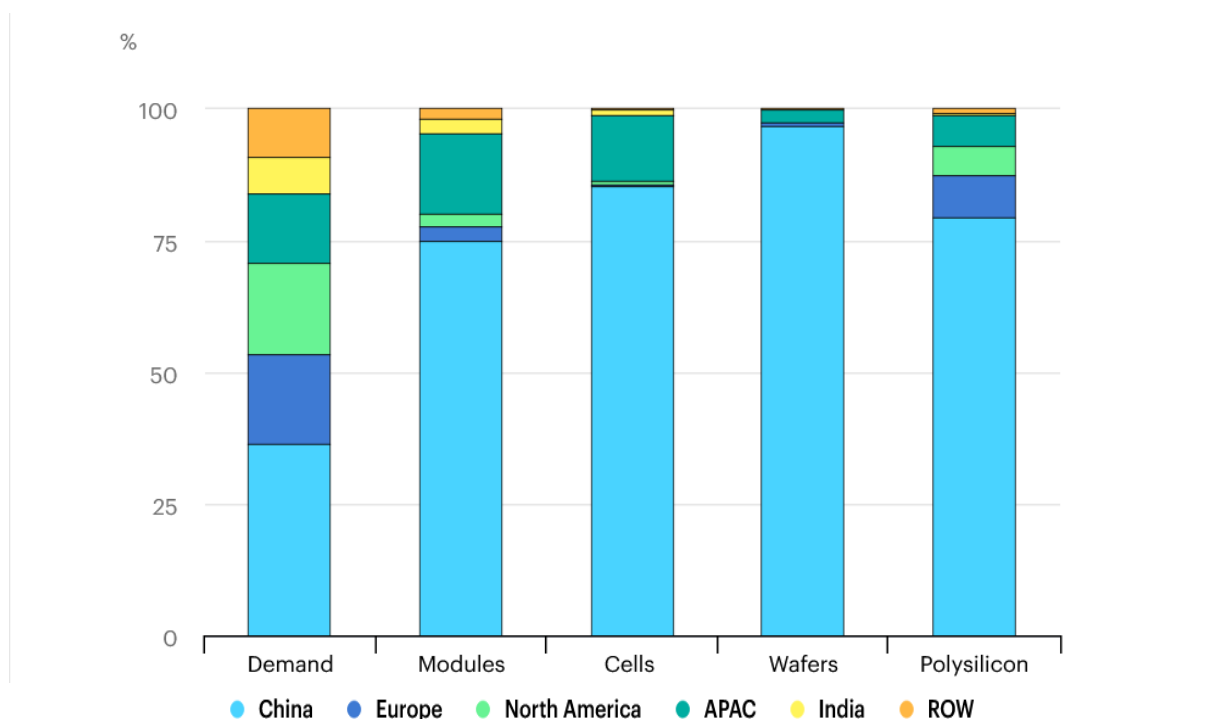
⁴ Dans ces chainons de la chaîne de valeur, la domination chinoise est si forte que 7 à 9 entreprises chinoises sont leaders de ces chainons. Cette domination chinoise est permise par un marché chinois très concurrentiel (Grau, Huo, Neuhoff, 2012) dans la production de ces trois composants mais aussi par un soutien étatique plus que généreux.

⁵, pour l'assemblage des modules, la domination est quelque peu amoindrie et représente plus de 70% de modules cristallins au monde du fait de barrières à l'entrée sur ce segment de la chaîne de valeur plus légères. En effet, l'assemblage de modules ne nécessite pas de lourds investissements en infrastructures, le coût fixe est donc plus léger. Cela n'empêche pas les entreprises de chinoise productrices de modules d'être les leaders du marché.

Cette domination de la chaîne de valeur mondiale par la Chine s'explique par un large marché intérieur favorisant le jeu des économies d'échelle au sein des entreprises, de faibles coûts d'importation du fait d'une chaîne de fabrication fortement internalisée, d'un facteur travail peu cher, et d'une politique volontariste des pouvoirs publics fondée sur un large programme d'électrification⁶ et un mix de subventions (Yongqing, Xiaohan, 2016), de normes et la création de clusters industriels (Huang et Liu, 2017). La conjugaison de ces éléments permet de bénéficier d'une compétitivité-prix et d'adopter une logique exportatrice, permettant de proposer des modules 30% moins chers que leurs concurrents étatsuniens (Smith, Woodhouse, Feldman, Margolis, 2021) et de dépasser leurs concurrents allemands (Grau, Huo, Neuhoff, 2012).

La maîtrise des approvisionnements et des débouchés qui caractérise l'industrie photovoltaïque chinoise contraste avec la dépendance de l'industrie européenne à l'égard des fournisseurs et clients étrangers (Commission Européenne, 2021). La situation est tellement inégale que, dans les années 2010, une grande partie de la filière européenne a disparu ou, *a minima*, a été fortement affaiblie. C'est le cas de Photowatt en France sauvée *in extremis* ou de SolarWorld en Allemagne qui fait faillite. Cet effondrement de la production européenne dans un contexte de subvention massive de la production d'électricité photovoltaïque a eu pour conséquence de renforcer la dépendance de la demande européenne aux producteurs extra-européens (Pasimeni, 2017) expliquant les 5 milliards d'euros de déficit commercial sur les modules photovoltaïques en 2015 dont la moitié avec la Chine et la réaction de l'IEA qui s'inquiète de la vulnérabilité que crée cette domination désormais quasi absolue (Figure 1).

Figure 1 -Capacité de fabrication de panneaux solaires photovoltaïques par pays et par région, 2021



Source : IEA (2022)

⁶ Le Brightness Program est un programme-cadre qui comprend le Township Electrification Program (TEP), mis en œuvre en 2002-2003, et le Village Electrification Program. Le TEP comprenait 20 MW d'énergie solaire photovoltaïque et éolienne, et 200 MW de petites centrales hydroélectriques pour fournir de l'électricité à plus de 1000 communes (les statistiques officielles font état d'un million de personnes concernées au total). Selon l'IEA, depuis le lancement du programme jusqu'en 2021 le gouvernement central a investi 240 millions USD pour fournir du matériel.

Par ailleurs, la dépendance européenne se manifeste plus spécifiquement sur six matières premières nécessaires à la fabrication des modules photovoltaïques mais également d'autres produits tout aussi stratégiques (Commission Européenne, 2022). C'est le cas du Germanium dont 43,3% de la consommation européenne provient de Chine, 13% de Russie et 12% des Etats-Unis, du Gallium dont 40% provient de Chine ou de l'Indium dont 34% des quantités utilisées dans l'UE sont originaires de Chine. La situation ne s'est améliorée que pour le silicium, grâce à des efforts de diversification qui ont permis à l'UE de n'être dépendante de la Chine qu'à hauteur de 12%.

Outre sa dépendance à l'égard des pays producteurs de terres et métaux rares, la chaîne de valeur européenne est très déséquilibrée. L'amont (polysilicium) et l'aval (installation et convertisseur) sont dominés par de gros acteurs dont l'importance résulte de la diversification de l'activité. Au milieu de la chaîne on trouve des PME mono-spécialisées. Cette dualité du marché européen tend à affaiblir la filière. Par exemple, l'Union Européenne occupe une place importante dans la production de polysilicium grâce à l'entreprise allemande Wacker-Chemie qui représente à elle seule 13% de la production mondiale en 2020. De même, l'offre européenne de convertisseurs et de connectiques (batteries, câbles) nécessaires à l'installation de systèmes PV reste très solide avec de nombreux acteurs (au moins neuf) qui disposent de capacités de production importantes comme les Espagnols Ingeteam et Power Electronics ou les allemands SMA, Kaco, Steca, Refus ou Kostal. Par ailleurs, le chaînon de l'assemblage de modules tend à se reconstituer en Europe avec plus d'une quarantaine d'entreprises mais ayant des capacités individuelles de production limitées. La principale faiblesse concerne la production de lingots, de plaquettes ainsi que de cellules pour lesquelles il ne reste presque qu'aucun acteur européen, les quelques-producteurs restants⁷ n'étant pas en mesure de satisfaire la demande européenne. À ces faiblesses s'ajoute une dispersion spatiale des entreprises de la filière qui contrarie le jeu des effets d'apprentissage dont peuvent bénéficier les industries clustérisées et dont l'économie de la transition écologique peut grandement bénéficier (Bridge et al., 2013).

Malgré cette dégradation de sa position sur le marché et tout au long de la chaîne de production, la filière PV présente des possibilités de rebond malgré son handicap majeur sur la fabrication des cellules solaires (Commission Européenne, 2022). À cela il y a plusieurs raisons. D'abord, le contexte est favorable. La demande de photovoltaïque restera croissante à moyen et à long terme en raison d'une stimulation tant conjoncturelle (Yi, 2016) que structurelle (Commission Européenne, 2022) au travers d'une politique en faveur de l'installation de panneaux solaires. En effet, le nombre total de panneaux PV installés devrait augmenter de plus de 1000 GW supplémentaires (SolarPower Europe, 2021) en 2025 ainsi qu'à long terme, en raison de la transition énergétique du continent européen. Ensuite, sur le plan technologique, l'industrie chinoise repose sur des produits et procédés moins avancés que ceux des producteurs européens et états-uniens. Enfin, des entreprises occupent des positions favorables sur des segments en amont et en aval de la filière. Tous ces éléments sont à resituer dans un contexte technologique relativement stable. Avant 2030, le secteur ne devrait pas connaître d'innovations disruptives majeures si bien que le marché restera encore largement dominé par le photovoltaïque à base de silicium polycristallin⁸ (Ministère de la transition écologique, 2020). La part des autres technologies (couches minces ou cellules tandem), aux rendements bien supérieurs, pourrait augmenter mais elles resteront encore minoritaires sur une assez longue durée ce qui justifie des

⁷ Le français Photowatt pour la production de lingots et de plaquettes, l'italien 3 Sun, le hongrois Ecosolifer, le lituanien Valeo et l'allemand Meyer Burger pour la production de cellules.

⁸ Le marché du PV est aujourd'hui dominé à 95 % par les technologies au silicium.

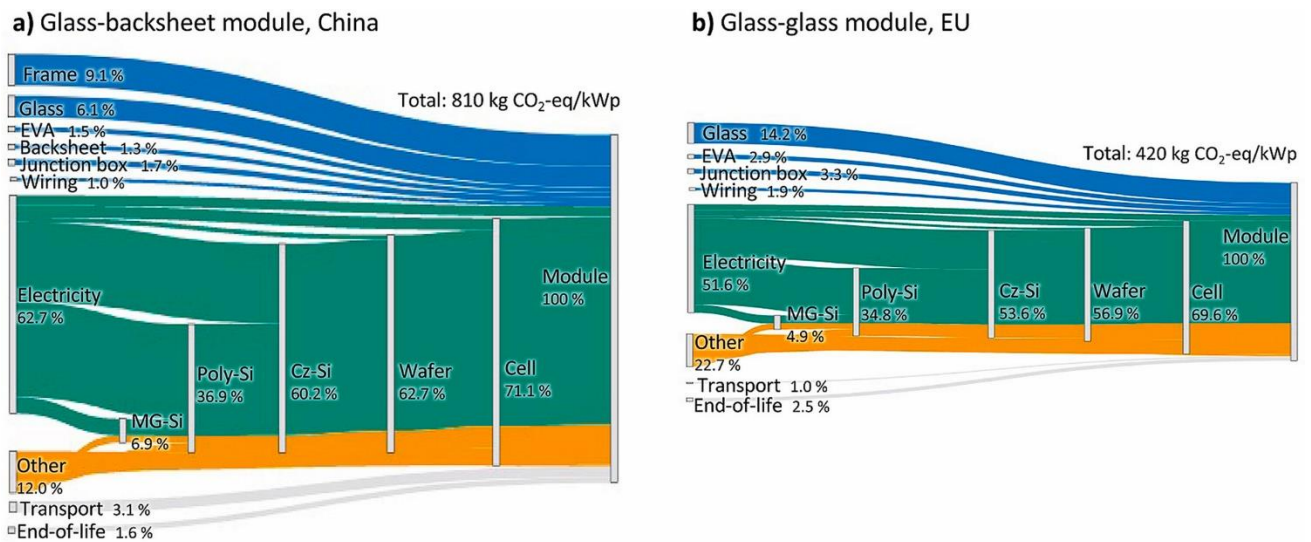
politiques industrielles ciblant la technologie au silicium même si les politiques d'innovation doivent considérer l'ensemble des technologies.

Pourquoi une politique industrielle européenne en faveur du PV ?

Au-delà de l'argument, clé, de la création d'emplois, la reconstruction de la filière PV pourrait être utile à d'autres secteurs dépendants tant des produits et composants photovoltaïques que des savoir-faire connexes de cette industrie⁹. Le développement du PV peut, en outre, également favoriser la croissance et l'expansion de certaines activités. C'est le cas, entre autres, de la production d'équipements et de machines-outils, dont les synergies avec le secteur PV sont fortes et prometteuses (Ministère de la transition énergétique, 2020). Enfin, la reconstitution d'une filière photovoltaïque industrielle est un moyen de sécuriser l'offre d'énergie renouvelable à moyen et long terme, notamment dans un contexte de transition énergétique.

La reconstitution d'une filière photovoltaïque présente également un intérêt environnemental qui constitue sans doute l'un des arguments majeurs d'une réindustrialisation de la filière. Recourir à des productions européennes serait un moyen de produire des panneaux solaires dont le coût carbone est moins élevé puisque la fabrication d'un module est deux fois plus émettrice de carbone en Chine qu'en Europe. Cette différence s'explique en grande partie par l'électricité utilisée pour fabriquer ces modules. La Chine dispose d'un mix énergétique principalement basé sur le charbon (IEA, 2022) tandis que le mix énergétique européen est d'une intensité carbone moindre du fait d'une transition énergétique plus avancée et le recours à des sources plus diversifiées comme le nucléaire ou les énergies renouvelables (IEA 2022).

Figure 2 – Intensité carbone de la production de modules PV selon l'origine



Source : Muller et al. (2021)

Le bilan est encore plus inégal si l'on intègre les déchets photovoltaïques en cours de production et post-consommation (Ludin, Mustafa, Hanafiah, Ibrahim, Mat Teridi, Sepeai, Zaharim, Sopian, 2018). Les deux chaînons les plus intenses en carbone sont en effet la production et la transformation du silice en silicium ainsi que le recyclage des déchets photovoltaïques (Liang, Sufang, Mengshi, William, Jerry, 2017). La génération de CO₂ liée à la phase de recyclage tend toutefois à diminuer grâce à de nouveaux

⁹ Par exemple, la fabrication de lingots ou de plaquettes peut servir dans le domaine médical ou des semi-conducteurs.

procédés. Elle et varie également selon les pays notamment entre ceux qui ont des normes environnementales élevées et qui maîtrisent des technologies bas-carbones de recyclage et les autres. De plus, du fait de leur durée de vie assez longue (30 à 55 ans), peu de panneaux solaires ont pour l'instant été recyclés (Kastanaki, Giannis, 2022) d'où la nécessité de prendre ces estimations avec précaution car d'ici 20 à 30 ans, en raison des innovations qui peuvent résulter du besoin de traiter des dizaines de milliers de tonnes de déchets photovoltaïques.

Produire des panneaux photovoltaïques en Europe permettrait d'alléger le coût carbone de la transition énergétique et environnementale¹⁰ : la relocalisation de 30% des nouvelles capacités de production permettrait d'éviter entre 30 à 45% de nouvelles émissions de CO2 en France d'ici 2030 et entre 13 et 21% en Allemagne (Ministère de la transition énergétique, 2020). Enfin, la reconstitution a aussi un enjeu politique et social. Dans la mesure où une large part des panneaux PV importés de Chine provient de la région du Xinjiang, il existe de forts soupçons d'enrôlement forcé de populations ouïgoures qui pose un problème de respect des droits humains (Le Borgn', 2021). Relocaliser une partie de la filière et instaurer un devoir de vigilance à l'échelle européenne permettrait d'éviter ce coût social et moral.

Quel mode et dispositifs d'action publique ?

La politique industrielle a longtemps été considérée comme un ensemble d'actions gouvernementales visant, à court terme, à soutenir l'industrie et l'emploi (Reich, 1982) et à long terme, à une meilleure allocation des ressources vers les secteurs ciblés pour la croissance économique future d'un pays (Krugman et Obstfeld, 1991). Mise en perspective avec le dérèglement climatique, elle est de plus en plus vue comme un outil qui permettrait d'accompagner la transition environnementale (Rodrik, 2014 ; Aiginger, Böheim, 2015). Cette nouvelle perspective appelle un renouvellement des moyens d'action des agents publics sur l'industrie notamment en faisant de ces politiques un « *processus de collaboration et de dialogue institutionnalisé [entre le secteur privé, le gouvernement et la société civile] plutôt qu'une approche descendante* » par laquelle les autorités publiques choisiraient les secteurs et les entreprises et leur transfèreraient des moyens. Dans la lignée de ces nouvelles pratiques, la transparence, le suivi et la responsabilisation des parties prenantes dans l'élaboration et la mise en œuvre de la politique doivent être a priori intégrés dans la définition des actions à entreprendre (Altenburg, Rodrik, 2017). Ce changement de gouvernance se combine avec la place occupée par l'innovation désormais considérée comme une condition nécessaire à la transition dans le secteur industriel (Aghion, Hepburn, 2019). Enfin, contrastant avec les politiques généralistes conçues pour ne pas distordre la concurrence, ces modes d'action reposent sur des logiques sectorielles pour répondre aux besoins des différents secteurs dans le cadre de politiques horizontales (Weller, O'Neill, 2014). Ces nouvelles considérations tant dans les finalités que dans le fonctionnement des politiques industrielles, ont favorisé l'émergence d'un nouveau courant d'économistes (Tagliapietra, Veugelers, 2020) réhabilitant une action publique active, ce qui n'empêche pas que des difficultés puissent accompagner la mise en œuvre de ces nouveaux préceptes, du fait notamment des débats qui portent sur le sens à donner à la réindustrialisation.

L'idée de réindustrialisation occupe une large place dans le débat public dans la mesure où elle est à la fois affichée comme un objectif politico-environnemental et vue comme un moyen d'enrayer une certaine forme de déclin industriel avec toutes les conséquences sociales qui en découlent (Bost,

¹⁰ Cette stratégie permettrait d'éviter les inconvénients de la voiture à moteur électrique dont le coût carbone de fabrication est si élevé qu'il n'est que difficilement compensée par son utilisation.

2017). Elle prend des formes variées depuis la réimplantation d'activités sur le territoire qu'elles avaient quitté, la création de nouvelles activités industrielles ou l'intégration verticale des groupes d'entreprises. Par ailleurs, la réindustrialisation implique également le maintien du tissu industriel (Mouhoud, 2017) soit par la reconversion d'un territoire avec une nouvelle activité clé, soit par une diversification des activités du tissu (Capello, Cerisola, 2022). Le cas de la filière photovoltaïque en Europe pourra combiner tous les aspects de la réindustrialisation. En effet, il sera nécessaire de relocaliser des activités ayant quitté le territoire européen (production de plaquettes en Allemagne), de maintenir et de renforcer les nouvelles activités d'assemblages des modules (France, Pologne, et Lituanie), et de créer de nouvelles activités de production de plaquettes et de lingots (France et en Italie).

La précédente approche de la politique publique s'appuie sur une vision complète de la filière qui contraste avec l'action publique en faveur du photovoltaïque laquelle, depuis plus de 15 ans, se concentre presque exclusivement sur la stimulation de la demande de PV en considérant que celle-ci stimulera par ricochet l'offre (Yi, 2016). Ainsi, dans le cadre du Grenelle de l'environnement de 2007, le gouvernement français avait décidé de subventionner davantage le consommateur au travers d'un prix de rachat par EDF très avantageux avec notamment des contrats sur 20 ans. Le prix de rachat était fixé à 314 € le MWh pour les installations au sol et de 580 € pour celles intégrées au bâti sur la base de contrats valables 20 ans¹¹. Une telle politique revenait donc à faire payer la rente des producteurs par les consommateurs d'électricité (par la CSPE). Le dispositif a fait l'objet de nombreux abus et a eu un effet spéculatif (Finon, 2013). Le nombre de demandes de raccordement a explosé : 3000 dossiers par jour déposés auprès d'EDF, principalement par le secteur agricole et de la grande distribution, contre une moyenne de 5000 par mois au cours de l'été précédent qui concernaient presque exclusivement le tarif de rachat à 580 €. Devant le coût de l'opération, estimé par le gouvernement à 2,8 Md€ par an, soit 56 Md€ sur 20 ans susceptible de provoquer une hausse de la facture d'électricité de 10 à 11 %, le gouvernement s'est résolu à faire marche arrière. La nouvelle politique, moins avantageuse, n'en reste pas moins orientée par une stimulation des installations.

Cette politique de stimulation est un échec à deux niveaux. Elle s'est révélée particulièrement peu efficace pour accroître les capacités installées (COPEE, 2022) dans la mesure seulement 10 GW sont aujourd'hui installés en France contre plus de 45 GW en Allemagne. De plus, ciblée sur la demande, cette politique énergétique a négligé le volet industriel de constitution et de structuration d'une offre photovoltaïque, laissant la part belle aux importations de panneaux et modules fabriqués en Chine. Loin de renoncer à soutenir la demande¹² il s'agit plutôt d'y combiner un volet industriel et de développer une offre européenne présentant à la fois des intérêts économiques et environnementaux.

Après des années d'érosion, la réindustrialisation de la filière photovoltaïque présente plusieurs défis à prendre en compte pour concevoir et mettre en œuvre les politiques publiques.

Le premier est d'admettre que cette politique n'aura que des effets à moyen et à long terme dans la mesure où non seulement l'élaboration mais également la mise en œuvre d'une politique peut prendre du temps (Smith, Woodhouse, Feldman, Margolis, 2019). Le second défi est d'éviter le saupoudrage d'argent public et les effets d'aubaine grâce à une bonne articulation des instruments

¹¹ On rappelle que le coût de l'électricité photovoltaïque était de 200€/MWh en juin 2010.

¹² D'ailleurs, la Commission a annoncé vouloir imposer « une obligation d'installer progressivement, entre 2026 et 2029, des équipements solaires sur tous les bâtiments publics et commerciaux neufs et existants dépassant une certaine taille et sur les nouveaux bâtiments résidentiels ».

locaux, nationaux et européens d'autant que peu de ressources sont allouées aux actions industrielles tant à l'échelle européenne que nationale (Landesmann, Stöllinger, 2020). Il est aussi important de calibrer les actions industrielles à la bonne échelle car la chaîne de valeur du photovoltaïque est assez longue et connectée à d'autres secteurs, certains chaînons formant des écosystèmes à eux-seuls comme la transformation de la matière première qui permet de fabriquer des micro-processeurs, ou la fabrication de batteries, utilisées pour le stockage de l'électricité et la mobilité électrique. Enfin, la plus grande difficulté provient de la nécessité de relocaliser ou de reconstituer des activités productives dont les savoir-faire ont été perdus et de récupérer des technologies délaissées. Ces défis sont d'envergure comme l'a rappelé la Commission, mais la reconstitution de la filière n'en reste pas moins réaliste. La suite de ce rapport propose cinq axes d'action pour y parvenir.

Reconstituer le stock de capital pour rééquilibrer une chaîne de valeur fractionnée

La désintégration de la filière photovoltaïque que la stimulation de la demande passée et à venir¹³ ne parvient pas à ralentir est à l'origine d'une perte de compétences et de capacités de production des entreprises. Ce recul est visible sur l'amont de la chaîne de valeur comprenant la transformation du silicium et des autres matières, et la production de lingots et de plaquettes, activités intenses en capital et exigeantes d'un point de vue technologique. Il s'observe également en aval depuis de la fabrication des cellules à l'installation des modules en passant par leur assemblage qui sont plus intensifs en travail (Yi, 2016)¹⁴. Pour éviter de persister dans les erreurs stratégiques mentionnées dès 2012 par Jean-Louis Beffa (2012) et assurer des chances raisonnables à une politiques de réindustrialisation ; il est désormais impératif de se tourner vers les capacités productives en passant notamment par la reconstitution du stock de capital tangible et intangible. Deux instruments de politique publique devraient permettre d'y parvenir.

- **Les PIIEC et l'alliance européenne du photovoltaïque, des instruments de planification ascendante pour un meilleur ciblage des besoins en capital de l'industrie PV.**

Une partie de la chaîne de valeur du PV, production de lingots, de plaquettes ou de cellules¹⁵, nécessite de lourds investissements de recomposition des capacités de production. Supporter les coûts fixes de ces actions ne serait pas possible sans ressources publiques, qui, outre un effet direct négatif sur les coûts permettent aussi aux entreprises d'atteindre plus rapidement le seuil de rentabilité. Or, dans l'Union Européenne, les soutiens aux entreprises ou aides d'Etat, sont en principe prohibés (article 107 du TFUE) afin d'éviter de fausser le jeu de la concurrence. Cette interdiction admet toutefois des

¹³ En février 2022, Emmanuel Macron a annoncé vouloir multiplier par dix les capacités solaires du pays. En 2029, tous les nouveaux logements résidentiels devront aussi être équipés de panneaux solaires PV. De son côté, la Commission européenne a annoncé l'obligation à partir de 2025 d'installer des panneaux solaires sur les bâtiments publics et les surfaces commerciales.

¹⁴ L'IEA (2022) estime que pour chaque GW supplémentaire, la production de poly silicium nécessite 50 à 100 emplois. Par ailleurs, l'IEA (2022) estime que pour chaque GW de production supplémentaire, dans des segments très intenses en travail comme la production de cellules ou l'assemblage de modules, cela requiert entre 450 et 650 emplois pour produire des cellules et 600-900 emplois pour les modules. Cela s'explique en grande partie par une automatisation limitée de ces étapes de production.

¹⁵ Actuellement la capacité de production de lingots et de plaquettes peine à atteindre 1,7 GW, et 0,8 GW pour les cellules (SolarPower, 2021).

exceptions. Les aides d'Etat sont ainsi autorisées lorsqu'elles bénéficient aux entreprises implantées dans tous les pays de l'UE¹⁶.

Les projets importants d'intérêt européen commun (PIIEC ci-dessous) servent ce type d'exception. Il s'agit d'un mécanisme qui facilite l'apport d'aides d'Etat si le projet à soutenir présente un intérêt européen et respecte certaines conditions (Commission Européenne, 2014). Malgré son intérêt, ce mécanisme n'est que rarement utilisé¹⁷ (Vogel, 2020). Un PIIEC va pourtant au-delà de la simple autorisation ; il peut même faire office d'instrument ascendant et collaboratif entre acteurs. En effet, un PIIEC est souvent associé à une alliance sectorielle/plateforme de concertation rassemblant acteurs privés comme publics, qui identifie les besoins globaux du secteur, étudie les capacités financières de membre du réseau et détermine les montants finalement attribués. L'alliance associée au PIIEC se transforme alors en instrument de planification émanant des acteurs privés dans laquelle les parties prenantes présentent des projets de construction de lignes de production (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Iris, 2020).

La Commission Européenne s'est récemment prononcée, dans une communication relative à une stratégie européenne pour le photovoltaïque, pour la constitution d'une alliance européenne du PV associée à un PIIEC afin d'identifier les besoins de la filière et d'évaluer les montants nécessaires pour y répondre (Commission Européenne, 2022), ouvrant ainsi la voie à un subventionnement de l'industrie à court terme (Redeker, 2021). Cependant, les montants mobilisés restent inconnus ; ils dépendront en grande partie de l'objectif choisi¹⁸ lors des concertations. On estime néanmoins que, pour la seule France, les investissements nécessaires représenteraient entre 400 millions et 1,2 milliards d'euros pour les étapes alliant la production de lingots aux modules (Ministère de la transition écologique, 2020). Comme pour le PIIEC sur la batterie¹⁹, ce mécanisme permettrait de financer différents projets d'usines en fonction du segment de la chaîne de valeur, soit en augmentant capacités de production déjà existantes, soit en créant de nouvelles capacités de production. Par ailleurs, des installateurs/exploitants comme EDF ou ENEL pourraient participer à certains projets. Enfin, dans le cadre de l'alliance, des opérateurs de filières ne manqueront pas d'apparaître, ce qui pourrait structurer davantage la filière et renforcer un état d'esprit collaboratif.

L'utilisation d'un tel instrument doit appeler à la vigilance (Eisl, 2021) car il n'est pas forcément adapté aux PME (Voestalpine, 2020) du fait de la complexité des procédures administratives d'intégration au Projet (Agoria, 2020). Cela est problématique car la filière européenne est principalement composée de PME notamment dans les segments où la réindustrialisation se fait la plus impérieuse. Une communication révisée²⁰ sur les règles en matière d'aides d'Etat en faveur des PIIEC

¹⁶ Article 107, §3, b.

¹⁷ Cet instrument n'a été utilisé que très récemment notamment pour permettre l'implantation d'usines de batteries électriques, pour financer la structuration d'une filière hydrogène ou pour renforcer l'offre européenne de microprocesseurs.

¹⁸ En effet, selon que les différentes parties se donnent pour objectif de relocaliser la production de PV de tant de %, les montants varieront, cela dépendra des concertations.

¹⁹ Dénommé projet « European Battery Innovation », il s'agit du deuxième projet important d'intérêt européen commun («PIIEC») visant à soutenir la recherche et l'innovation dans la chaîne de valeur des batteries. Le projet couvrira l'ensemble de la chaîne de valeur des batteries : l'extraction des matières premières, la conception et la fabrication des cellules et des packs de batteries et, enfin, le recyclage et l'élimination dans le cadre d'une économie circulaire, en mettant fortement l'accent sur la durabilité.

²⁰ La communication révisée facilite la participation des petites et moyennes entreprises (PME) aux PIIEC et renforce les avantages liés à leur participation au moyen de modalités spécifiques pour l'appréciation de la compatibilité des aides en faveur des PME, comme la possibilité pour les plus petites entreprises d'apporter aux projets une contribution propre plus limitée que la contribution exigée par ailleurs. La communication révisée encourage également les collaborations entre les plus grandes entreprises participant à un PIIEC et les PME.

facilite l'accès des PME à ces dispositifs notamment en leurs proposant une intensité d'aide plus élevée pour cette catégorie, une réduction des charges administratives avec des procédures simplifiées (autorités italiennes, 2020) et une uniformisation des procédures de candidature et de notification entre les Etats membres (Agoria, 2020 ; Eisl, 2021).

- Une politique financière de l'Union adaptée à une filière de production essentiellement constituée de PME

Le volet financier de la stratégie industrielle européenne axée sur les PME se révèle être un autre instrument de stimulation du facteur capital et technologique pour une filière photovoltaïque justement constituée de PME. Celui-ci se décline principalement sous forme de subventions justifiées tant économiquement (surmonter les difficultés de financement) que juridiquement (réduire la complexité administrative). Un tel instrument faciliterait une meilleure allocation des ressources (Carré et Levratto, 2019) et améliorerait la rentabilité des projets (Atzeni, Carboni, 2008). Juridiquement, le volet financier est accepté car il s'inscrit dans un intérêt général européen et non national.

La structure même du volet financier de la stratégie s'oriente vers une stimulation du facteur technologique en prévoyant la possibilité d'un subventionnement de différentes phases successives d'un projet d'innovation depuis les phases amont (recherche) jusqu'à l'aval (mise sur le marché) en passant par les différentes étapes du développement²¹. S'y ajoute l'impératif de transition environnementale, vu comme un moyen d'atteindre une certaine compétitivité sur les marchés internationaux (Commission Européenne, 2020). Bien que les montants en jeu restent assez modestes (Landesmann, Stöllinger, 2020), cela n'empêche pas cette politique d'exercer des effets microéconomiques visibles sur une filière.

Aujourd'hui trois fonds spécifiques pourraient être mobilisés comme instruments de réindustrialisation de la filière.

- Le programme InvestEU²², héritier du plan Juncker, vise à stimuler l'investissement au sein de l'Union Européenne grâce à des garanties d'investissement par des acteurs publics comme la Commission Européenne ou la Banque européenne d'investissement et ce, afin d'inciter des investisseurs privés à participer à des projets d'investissements. Ce programme vient rompre avec la logique traditionnelle des subventions du « un euro du secteur public égal à un euro pour le secteur privé » (Sant, 2014) grâce à un effet multiplicateur évalué entre 11 et 13 selon les études. En effet, avec un tel système de garantie, les résultats sont plus que proportionnels aux sommes allouées par le secteur public au secteur privé²³. Au-delà du volet financier, le programme comporte un volet de mise en relation entre les PME et les investisseurs et un volet conseil. Ainsi, actuellement, le programme garantit un appel de fonds à hauteur de 1,3 millions d'euros pour un projet d'usine d'assemblage de modules photovoltaïque nouvelle génération en Aquitaine. En juin 2022, 40% des fonds nécessaires sont rassemblés.

²¹ En finançant le cycle de vie d'un projet innovatif : recherche et développement, démonstration et commercialisation

²² Règlement (UE) 2021/523 du Parlement européen et du Conseil du 24 mars 2021 établissant le programme InvestEU et modifiant le règlement (UE) 2015/1017, JOUE L 107 du 26 mars 2021, p. 30-89.

²³ Les résultats tant microéconomiques que macroéconomiques de l'ancien programme ont été plus que reconnus (Commission, 2018).

- Le Fonds pour l'innovation²⁴ justifie son existence par la nécessité de disposer d'industries moins polluantes afin de respecter les engagements climatiques de l'Union²⁵ (Ministère de la transition écologique, 2021)²⁶. Ce fonds vise à soutenir financièrement la démonstration d'innovations industrielles ayant pour but réduire l'incidence carbone. Il est ainsi un instrument financier s'inscrivant pleinement dans la logique des nouvelles politiques industrielles en contribuant tant à des objectifs industriels qu'environnementaux. Récemment, le fonds pour l'innovation a contribué à financer le projet Tango d'ENEL Green Power, visant à installer une GigaFactory de modules photovoltaïques bifaciaux hétérojonction à Catane (Italie), notamment en renforçant un tissu industriel de l'usine 3SUN déjà présente grâce à l'augmentation des capacités de production de 200 MW/an à 3 GW/an. Enfin, au-delà de sa riche dotation, (entre 30 à 38 milliards d'euros jusqu'en 2030), le fonds finance tant des projets à grande échelle qu'à petite échelle, favorisant ainsi l'accès à des financements des PME du secteur photovoltaïque. En avril 2022, la Commission Européenne a lancé son deuxième appel à projets à petite échelle ; le Syndicat des professionnels de l'Energie solaire le diffuse auprès du secteur afin d'inciter celui-ci à bénéficier des financements européens.
- S'ajoutent à ces deux fonds, les fonds structurels qui, en raison de leurs montants et de leur gestion partagée entre les institutions européennes (Etats membres et entités locales), peuvent se révéler une source non négligeable de financement supplémentaire pour les PME. Néanmoins les effets de ces programmes sur la compétitivité des PME sont flous. Selon les méthodes employées, certaines évaluations concluent que le programme est un succès (Sternberg, 2012 ; Fernández-Serrano et Romero 2014), quand d'autres, en revanche, ne constatent pas forcément de réels effets sur la compétitivité à court terme ou une corrélation significative (Tödtling-Schönhofer, 2011 ; Čadil, Mirošník, Reháč, 2017).

Recréer les compétences perdues par la mise en œuvre d'actions multi-sectorielles et territoriales de la gestion des compétences

Le besoin de reconstitution du stock de capital et de l'équipement des entreprises s'accompagne d'un besoin croissant en facteur travail pour accompagner le renouveau de la filière et l'accroissement de la demande. Jusqu'en 2025 le nombre d'emplois créés pourrait avoisiner les 10 000 dans la fabrication de lingots, plaquettes et cellules si ces activités faisaient l'objet d'un plan industriel européen (Solar Power, 2021). Le besoin de main d'œuvre ne se comblera pas spontanément ; aussi l'activation d'instruments devra nécessairement être intégrée aux politiques de soutien à la filière.

- **Des instruments coopératifs en faveur d'une formation initiale des travailleurs**

Tandis que les mesures en faveur du capital visent principalement à réduire les coûts fixes, celle du qui visent le facteur travail ont vocation à faire baisser les coûts variables et réaliser des gains de productivités par une gestion optimisée des compétences. Le renforcement des compétences nécessaires à la filière est un élément structurant de la politique à mettre en œuvre en raison de la disparition de pans entiers de l'industrie du PV. Deux types d'instruments peuvent répondre à ce

²⁴ Règlement délégué (UE) 2019/856 de la Commission du 26 février 2019 complétant la directive 2003/87/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les modalités de fonctionnement du Fonds pour l'innovation, JOUE L 140/6, du 28 mai 2019, p. 6–17.

²⁵ Rappelons que le secteur industriel est à l'origine de plus de 14% des émissions de CO2 dans l'Union européenne.

²⁶ Rapport DATALAB, « Chiffres clés du climat France, Europe et Monde », Ministère de la transition écologique, 2021, p. 38.

besoin : des instruments horizontaux entre entreprises et des instruments verticaux entre l'Etat et ces mêmes entreprises.

- Les instruments de coopération horizontale

Le concept de spécialisation cognitive (Gros-Balthazard 2018 ; Granier, Ellie, 2021) implique de dépasser l'idée de la spécialisation territoriale classique en mettant l'accent non sur un produit spécifique mais par une ou des compétence(s) clé applicable(s) à un plusieurs secteurs. L'avantage d'une telle spécialisation est la diversité industrielle d'un tissu cognitivement spécialisé qui en résulte, le rendant plus résilient aux crises. Une telle approche pourrait être un levier de réindustrialisation en ce qu'elle permettrait de re-maîtriser les compétences nécessaires en partant de la base de compétences connexes et proches dont disposent d'autres secteurs et de conférer un avantage comparatif aux entreprises du tissu (Bourdu, 2014). De plus, une gestion optimisée du capital humain peut avoir un effet de *spillover* sur la productivité de l'ensemble de la région (Ramos, Suriñach, Artís, 2010).

Concernant le cas du photovoltaïque, un rapprochement avec le secteur de l'équipement industriel (machinerie industrielle) pourrait être une voie intéressante. En effet, ce secteur est non seulement présent en Europe, notamment en Allemagne (Grau, Huo, Neuhoff, 2012), mais aussi en France avec les entreprises ECM Greentech ou Semco-Smartech (Ministère de la transition écologique, 2021). Les équipementiers photovoltaïques européens ont ainsi pu en partie subsister malgré la destruction de la filière photovoltaïque en diversifiant leurs débouchés vers d'autres secteurs (Grau, Huo, Neuhoff, 2012) et en adoptant une logique exportatrice (Ministère de la transition écologique).

Le secteur fait néanmoins face à des défis dont la sortie de la dépendance aux marchés étrangers concernant la machinerie de production photovoltaïque et le renforcement de son avantage par une stratégie de différenciation fondée sur l'innovation. La dynamique économique et les performances des acteurs de ces deux filières sont donc interdépendantes. À court comme à moyen terme, la bonne santé de la machinerie est essentielle pour permettre de retrouver les compétences perdues du secteur photovoltaïque. Un rapprochement entre ces deux composantes devrait prendre forme à différentes échelles : locales entre les entreprises d'un même territoire, nationale avec des concertations entre différents opérateurs de filières et européenne à travers l'alliance européenne pour le photovoltaïque qui vise notamment à cartographier les besoins en compétences du secteur. Ces points de contact sont nécessaires pour identifier les besoins communs des deux filières et leurs intérêts mutuels.

- Les instruments de coopération verticale

Pour que la collaboration intersectorielle soit pleinement efficace, elle doit être soutenue par l'Etat qui dispose d'un effet levier suffisant pour réaliser une opération de formation à grande échelle. Ce besoin est d'autant plus urgent à prendre en charge qu'en 2030, 130 000 emplois seront créés dans la production photovoltaïque en Europe (Solar Power, 2021). Le rapprochement du PV avec des secteurs possédant la même spécialisation cognitive est une solution envisageable (OCDE, 2012) reposant par exemple sur la constitution d'un cluster de compétence ou le développement d'un « *Career Pathway* » afin de renforcer la compétitivité collective (Carré et Levratto 2019) .

Différentes études (Maryland State Department of Education, 2007 ; OCDE, 2012) se sont intéressées aux facteurs clés pour faire émerger un cluster de compétence. L'engagement des employeurs en fait partie car les programmes élaborés par l'Etat doivent répondre aux demandes des entreprises. Dans le cas du photovoltaïque, le partenariat public/privé sera facilité par le petit nombre d'entreprises opérant dans le secteur. Par ailleurs, un équilibre entre les besoins des employeurs et des collaborateurs doit être trouvé notamment en proposant des parcours de carrières à long terme,

vecteur de prévisibilité pour tous, et une formation complète. De plus, presque tous les modèles mettent en avant l'intérêt de proposer des services de soutien visant à accompagner les individus durant leur formation, une flexibilité dans la conception du programme, une ambiance studieuse au sein de la formation et une collaboration institutionnalisée (OCDE, 2012). Tous ces sujets doivent faire l'objet d'une discussion entre les partenaires. Ainsi, l'Etat peut investir davantage dans l'élaboration et la généralisation de formations dédiées à la production d'énergies renouvelables, en proposant des formations tant généralistes que professionnelles²⁷.

Enfin, l'investissement dans l'innovation et la recherche est un moyen d'acquérir des compétences nouvelles sur des nouveaux procédés, faisant de l'innovation une voie de réappropriation des compétences productives. L'Etat et l'Union Européenne grâce à des subventions seraient en mesure d'orienter une partie de la recherche sur de nouveaux procédés de production. C'est ce qui semble se dessiner dans le cadre du PIIEC sur le photovoltaïque et de l'alliance pour le photovoltaïque (Commission Européenne, 2022).

- [Des instruments coopératifs et aux territorialités multiples en faveur d'une formation continue des travailleurs](#)

La reconstitution ou le renforcement des compétences peut aussi s'opérer grâce à des dispositifs d'action permettant aux entreprises de mieux anticiper leurs besoins et allouer leur personnel.

Le groupement d'employeurs (GE) passe par un organisme qui peut être une association ou une société coopérative (Lethielleux, André, 2019 ; André, 2016) constituée d'entreprises ou d'associations qui mettent à la disposition des autres membres des salariés en temps partagés (Zimmermann, 2006). Il constitue l'instrument local par excellence pour permettre d'acquérir des compétences clé et est particulièrement avantageux pour les PME dans la mesure où il permet une mutualisation de la main d'œuvre (Carré, Levratto, 2009) grâce à une minimisation des coûts de recrutement et de la gestion des compétences (Lethielleux, 2018). En recourant à ce mécanisme les PME bénéficient d'un double avantage. Il permet non seulement de réduire les coûts de production et *in fine* le prix de vente du produit mais aussi d'acquérir de nouvelles compétences clés propices à la réalisation de gains de productivité.

Un groupement d'employeurs peut être mono-sectoriel comme multi-sectoriel. La différence entre les deux est que ce dernier ouvre la voie à une diversification des compétences. Etant donné que la filière photovoltaïque européenne est à la recherche de compétences, un groupement d'employeurs multi-sectoriel serait une voie à privilégier car il constituerait un levier important dans la constitution d'une spécialisation cognitive à l'échelle locale, notamment si les entreprises-membres sont issues de secteurs connexes comme le secteur métallurgique, de la machinerie industrielle ou même des microprocesseurs. À l'échelle territoriale, le bénéfice tiré par un tel mécanisme serait soit une bifurcation productive notamment pour des territoires spécialisés dans le secteur métallurgique qui se tourneraient progressivement vers le photovoltaïque (*path dependence*), soit de diversification du tissu industriel (Capello, Cerisola 2022) grâce à des employés qui disposeraient de poly-compétences clés. Enfin le dernier avantage d'un GE multi-sectoriel serait que la logique de pluriactivité permettrait à

²⁷ Du fait d'un large éventail de compétences nécessaires, ces formations pourraient être généralistes et poussées en allant jusqu'au master voire au doctorat pour former des ingénieurs et des chercheurs. Elles pourraient aussi être des formations professionnelles pour former des techniciens. De plus, l'Etat, en collaboration avec le secteur, devrait soutenir l'apprentissage dans cette filière, l'association de la formation académique avec une formation professionnelle est le meilleur moyen pour le formé d'acquérir rapidement des compétences. Par exemple, l'Etat pourrait encourager l'élaboration d'une branche énergie renouvelable dans les écoles de production.

l'ensemble des membres participant d'acquérir un avantage compétitif par rapport à d'autres territoires où une telle imbrication entre les acteurs ne serait pas présente (Aït Razouk, 2014).

Cependant, pour qu'un GE multi-sectoriel puisse fonctionner, il faut que les salariés partagés réussissent leurs processus de socialisation dans les différentes entreprises. Dans le cas contraire, le salarié n'est pas véritablement intégré dans la PME, mettant par conséquent en échec tout partage de compétences et de connaissances. Dès lors, les PME du secteur photovoltaïque accueillantes doivent être vigilantes concernant l'intégration des salariés partagés. De plus, il est primordial que les salariés échangés participent directement au processus de production des modules photovoltaïques et non des salariés faisant partie des activités de soutien comme des comptables ou des juristes. L'autre écueil à éviter est que ces partages de compétences soient dominés et organisés par des grands groupes. Il y aurait alors un risque de captation des compétences clés sans partage mutuel ce qui pourrait accroître le risque d'un conflit de fidélité pour le salarié partagé (Garsten, 2003). La filière photovoltaïque devrait davantage privilégier des GE constituées principalement de PME afin d'éviter une relation asymétrique. Enfin, le dernier risque associé aux GE provient de possibles contradictions entre concurrence et coopération pour les membres de GE mono-sectoriels.

L'organisation des compétences à l'échelle européenne peut également être envisagée de manière avantageuse par les entreprises de la filière, et notamment les PME, car des échanges ou collaborations peuvent leur donner accès à des informations externes (Owen-Smith, Powell, 2002 ; Bathelt, 2004). Ces dernières permettent à un cluster/ territoire de « s'accrocher au système mondial de production et d'innovation » (Lorenzen, Mudambi, 2013, Colovic, 2019). L'attache européenne permet aussi de lier entre elles des PME qui n'ont pas forcément le même esprit de coopération. Pour Colovic (2019), les alliances permettent « de combiner les partenaires ressources et compétences pour atteindre les objectifs stratégiques », et les « alliances technologiques sont particulièrement cruciales pour améliorer la base de connaissances des partenaires ».

Deux types d'alliance peuvent être envisagées : une alliance européenne incluant tout le secteur, ce qui semble se dessiner avec l'alliance européenne pour le photovoltaïque mais avec le risque qu'un échec pourrait fragiliser l'ensemble de la filière, ou la constitution d'une multitude d'alliances entre les différents territoires industriels européens qui permettrait aux PME de ce secteur de constituer un portefeuille d'alliance. Pour Colovic (2019), les organisations ont intérêt à construire « un ensemble d'alliances ou un portefeuille d'alliances en raison de l'incertitude environnementale et pour réduire les effets d'un échec d'alliance » et « la configuration du portefeuille est cruciale pour assurer l'optimisation des ressources investies dans les alliances et les avantages qui découlent du portefeuille de l'alliance ».

Ces deux types d'alliances ne sont pas incompatibles. Ainsi, l'Alliance européenne pour le photovoltaïque (Commission Européenne, 2022) pourrait être le support pour l'ensemble des entreprises européennes du secteur qui se retrouveraient afin de discuter et d'établir des liens. Cette alliance européenne pourrait progressivement inclure des alliances inter-clusters. En effet, étant donné que la connaissance est dispersée géographiquement (Cantwell, Piscitello, 2015), une telle structure permettrait d'opérer ce partage, de mutualiser des ressources et d'acquérir une compétitivité collective à l'échelle européenne. La combinaison de la mutualisation et des économies d'échelle permettrait alors des baisses de coûts de productions et des gains de productivités qui permettraient de réduire les prix des produits photovoltaïques européens tout en favorisant l'innovation.

L'un des moyens de partage des compétences au sein de l'alliance consisterait en la mise en place de formations en immersion dans une entreprise membre du réseau pour une durée courte et déterminée. Cet « Erasmus » professionnel serait un bon moyen de partager des compétences et des

connaissances. Cependant, les barrières linguistiques pourraient constituer des freins au processus de socialisation des salariés (Lethielleux, 2019), condition *sine qua non* pour qu'un tel mécanisme réussisse et fasse effet.

Sécuriser et verdir la chaîne de valeur à moyen et long terme

La réindustrialisation ne peut se cantonner à une politique de court terme visant simplement à restaurer les fonctions productives ; d'autres impératifs de long terme commandent une extension de son champ d'action. La sécurisation des approvisionnements et le verdissement de la chaîne de valeur, qui se rejoignent dans un même objectif de durabilité de la chaîne de valeur à long terme, font partie des moteurs du maintien de l'industrie, voire de la réindustrialisation.

- Une stratégie sur l'approvisionnement comme sécurisation des inputs de la chaîne de valeur

La sécurisation des chaînes d'approvisionnement est devenue un impératif économique majeur. Eviter la mise à l'arrêt d'unités de production dans une filière photovoltaïque reconstituée est d'autant plus important que celle-ci sera longtemps fragile.

La chaîne de valeur photovoltaïque reconstituée pourrait être vulnérable à des perturbations de ses chaînes d'approvisionnement du fait de dépendances stratégiques à des matières premières. Consciente de ces risques économiques, dès le début des années 2010, la Commission Européenne (Commission Européenne, 2011) a lancé ses premières listes d'évaluation des dépendances. Elle a renouvelé l'exercice à trois reprises, en 2014, 2017 et enfin 2020 (Commission Européenne, 2014, 2017 et 2020). Lors de la dernière évaluation, au moins trente dépendances stratégiques, dont certaines concernent directement la chaîne de valeur photovoltaïque européenne, ont été constatées. L'idée de la Commission Européenne est de se concentrer prioritairement sur les dépendances dont la sécurisation aurait des portées multisectorielles. C'est par exemple les terres rares, lourdes ou légères, qui servent dans la fabrication de moteurs à tractions, de batteries, d'éolienne et de panneaux photovoltaïques (Commission Européenne, 2020). Parmi les dépendances identifiées, sept matériaux sont utilisés dans le processus de production d'un module photovoltaïque, on y trouve le gallium, le lithium ou encore le silicium métal (Commission Européenne 2020).

Face à ces dépendances identifiées, la Commission a décidé conjointement avec les Etats membres de lancer un plan visant à sécuriser les chaînes de valeurs par des mesures ciblées sur l'approvisionnement en matières premières (Commission Européenne, 2020). Ce plan s'inscrit dans le cadre d'une alliance nouvelle constituée, l'Alliance européenne pour les matières premières. Elle repose sur la même logique que les précédentes, se voulant être une plateforme de collaborations avec tous les acteurs du secteur, entreprises comme gouvernants, afin d'identifier les blocages, les opportunités et les possibilités d'investissement tout au long de la chaîne de valeur, de la production minière au recyclage des déchets (Tribune des métaux, 2020). À la différence des autres alliances, celle-ci ne se repose pas sur un PIIEC car, en raison de son intérêt multisectoriel, certains de ses outils ont été transférés à d'autres alliances. Quatre pistes ont été identifiées pour sécuriser les approvisionnements :

- Diversifier les sources d'approvisionnement afin de minimiser les perturbations économiques pour l'industrie européenne en cas de crise économique ou géopolitique. L'extraction et la transformation avec des technologies bas carbone en Europe de certaines matières comme le lithium est aussi étudiée.
- Constituer des stocks pour amoindrir les perturbations par des partenariats plus étroits entre les principaux fournisseurs de matières critiques comme le Canada ou certains pays africains.

- Intensifier les interactions avec les investisseurs afin de les inciter à participer à des projets de développement stratégique notamment au travers d'une plateforme d'investissement dans les matières premières (RMIP) similaire à celle du programme InvestEU.
- Développer le recyclage de manière à avoir accès à des matières secondaires utilisables.
- [La politique européenne en faveur de l'économie circulaire comme outil écologique et industriel](#)

La rareté des métaux et l'impératif écologique passent par un meilleur traitement des futurs déchets photovoltaïques, la réduction de l'impact carbone et la sécurisation des inputs de la chaîne de valeur PV.

L'utilisation du photovoltaïque et plus largement la transition énergétique devraient, à terme, engendrer une importante quantité de déchets qu'il faudra traiter correctement (Weckend et al., 2016; Bloomberg.Com, 2020 ; IEA, 2021). À l'horizon 2040-2050, les Etats européens seront déjà confrontés à leur première vague de déchets photovoltaïques, estimée entre 14,3 et 18,5 Mt de déchets, provenant principalement des panneaux installés dans les années 2010 (Kastanaki, Giannis, 2022). Avec la reconstitution des capacités productives européennes, il faudra aussi traiter les panneaux photovoltaïques endommagés lors du processus de production (Hamouda, Tkouti, Mouss, Hamouda, Malek, 2012). C'est pourquoi, les pouvoirs publics doivent dès à présent se mobiliser pour élaborer des politiques de recyclages plus affirmées.

Dès 2012, l'Union Européenne a commencé à s'investir sur ce sujet en adoptant une directive relative au traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)²⁸. Poussée par l'Allemagne et l'Italie, en pleine révolution photovoltaïque, l'Union Européenne a décidé de considérer les déchets photovoltaïques comme des déchets électriques et électroniques. Ce texte européen vient notamment régir toutes les règles de traitement des DEEE :

- en encourageant la coopération entre les producteurs et les recycleurs pour concevoir des équipements électriques pouvant être réutilisés, démantelés ou valorisés conformément à la directive en matière d'écoconception (directive 2009/125/CE)²⁹,
- en réduisant au minimum l'élimination des DEEE avec les déchets municipaux non triés,
- en permettant aux ménages et aux distributeurs de rapporter gratuitement les DEEE
- en interdisant l'élimination des DEEE collectés séparément et n'ayant pas été traités correctement,
- en garantissant un taux de collecte annuel minimal des DEEE (Eur-Lex, 2019³⁰).

S'ajoute à cette directive, les premières initiatives de la Commission dans le domaine notamment par la définition des premières bases de la stratégie européenne pour l'économie circulaire. La communication relative à « un nouveau plan d'action pour une économie circulaire : pour une Europe plus propre et plus compétitive » (Commission Européenne, 2020, 2022), préconise des premières mesures visant à concevoir des produits plus durables ce qui, dans le cadre des panneaux photovoltaïques, se traduirait par un allongement de leur durée de vie. Le recyclage des panneaux photovoltaïques représente aussi une voie qui permettrait de faire baisser le coût carbone des nouveaux photovoltaïques produits car l'empreinte carbone d'un aluminium secondaire (issu du recyclage) est 96% inférieure à celle de l'aluminium primaire. Ce taux est de 61% pour le zinc et 38% pour le lithium

²⁸ Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE OJ L 197, 24.7.2012, p. 38–71.

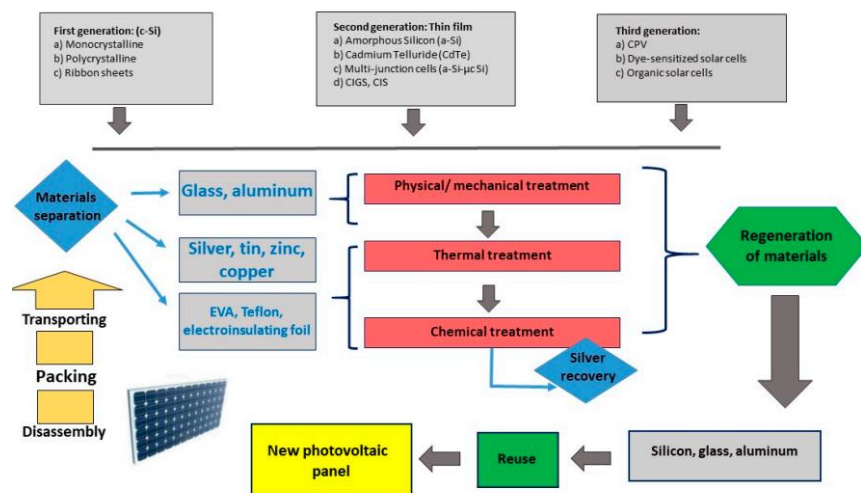
²⁹ En faisant peser sur la filière productrice le soin d'organiser la fin de vie de leurs produits.

³⁰ [EUR-Lex - 200403_1 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)

(KU Leuven, 2022). Cependant, le recyclage de ces matériaux doit se faire dans de bonnes conditions en raison des risques de pollution supplémentaire qu'il comporte.

Au-delà des enjeux écologiques, le recyclage représente aussi une opportunité économique. En effet, si le composant principal à retirer des déchets photovoltaïques est le verre³¹ (IRENA, 2016) qui possède une faible valeur, les bénéfices tirés de matériaux comme le gallium, le tellure ou l'indium sont estimés à hauteur de 21,98 à 27,36 milliards de dollars (Kastanaki, Giannis, 2022). Aujourd'hui au niveau mondial, seulement entre 0,2 et 0,4% de la matière est réutilisée pour produire de nouveaux panneaux ou modules PV. Selon l'Agence internationale de l'énergie, en 2050, 64% du fer utilisé dans la production proviendrait de son recyclage, 23% du verre, 21% de l'aluminium (IEA, 2022). En Europe, cette part devrait être sensiblement plus élevée³².

Figure 3 – Processus de recyclage et réemploi des matériaux PV



Source : Włodarczyk (2022)

Le lien entre recyclage et sécurisation de la chaîne de valeur pour un ensemble d'écosystèmes industriels a été consacré très récemment par la Commission au travers de sa communication « Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité » (2020). L'économie circulaire offre en effet trois possibilités : créer des emplois, réduire les dépendances et sécuriser les chaînes de valeur et, enfin, respecter les objectifs carbone de l'UE. Dans le cadre de l'alliance européenne pour les matières premières, la Commission voudrait notamment recenser toutes les possibilités d'approvisionnement en matières premières et secondaires critiques qui proviendraient directement des stocks de déchets et d'élaborer, en collaboration avec l'ensemble des acteurs de la filière, des projets de récupérations viables et bas carbone (Commission EIT Raw Materials, 2020).

Cependant la constitution d'une filière du recyclage doit tenir compte des conditions micro et macroéconomiques. En effet, comme le photovoltaïque a été inclus dans la directive DEEE, il revient à la filière d'organiser le recyclage de ses propres produits. Alors que le secteur est non seulement dominé par la Chine mais aussi très concurrentiel, la filière européenne doit minimiser le coût du traitement des déchets pour rester dans la course (Göllei et al., 2012³³) ce qui implique une optimisation des étapes de collecte et de traitement (Choi, Fthenakis, 2014). De plus, pour qu'une telle filière soit

³¹ Il représente environ 80% de toutes les matières recyclées.

³² V. *infra*.

³³ A. Göllei, P. Görbe, A. Magyar Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems J. Clean. Prod., 34 (2012), pp. 138-145.

viable, il faudra que les politiques publiques se concentrent sur la rentabilité économique des centres de recyclage (Choi, Fthenakis, 2014)³⁴ ce qui passe par la prise en compte de plusieurs éléments tels que la détermination des emplacements optimaux des centres pour réduire les coûts des collectes (Choi, Fthenakis, 2014) et la disponibilité d'une quantité annuelle minimale de déchets³⁵. En fonction des scénarios sur la durabilité des installations photovoltaïques, en 2040 de nombreux Etats membres n'atteindraient pas la quantité plancher de déchets photovoltaïques (notamment en Europe) et ne seraient pas en mesure d'être économiquement viables. Dès lors, une coordination européenne au même titre que la réindustrialisation de la filière est nécessaire (Kastanaki, Giannis, 2022).

Protéger l'industrie et favoriser la transition écologique

Le Mécanisme d'ajustement carbone aux frontières constitue une innovation juridico-économique majeure. Il est aussi un instrument modèle des nouvelles politiques industrielles par sa capacité à viser simultanément des objectifs économiques, environnementaux et de souveraineté.

- **Un MACF ambivalents aux effets potentiellement contradictoires pour le PV européen**

Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) initié par la Commission européenne a vocation à éviter les fuites carbonées rendues possibles par le fonctionnement du système d'échange de quotas d'émission (SEQE) de l'UE (L'Heudé, Chailloux, Jardi, 2021). Son fonctionnement prévoit que « Les importateurs de l'UE achètent des certificats carbonés correspondant au prix du carbone qui aurait été payé si les marchandises avaient été produites conformément aux règles de l'UE en matière de tarification du carbone. À l'inverse, dès lors qu'un producteur hors UE démontre qu'il a déjà payé un prix pour le carbone utilisé dans la production des marchandises importées dans un pays tiers, le prix correspondant sera entièrement déduit pour l'importateur de l'UE » (Broussolle, 2021). Ce mécanisme peut ainsi protéger l'industrie européenne commercialement dans sa transition environnementale en évitant une forme de dumping environnemental (Broussolle, 2021).

Le MACF serait actuellement testé sur des produits dont la fuite carbone due au SEQE est jugée élevée. Le ciment, l'acier, l'engrais, l'électricité et l'aluminium sont les premiers concernés par ce mécanisme, et son extension à d'autres marchandises est prévue (Commission Européenne, 2021). À ce stade, la filière photovoltaïque est indirectement concernée par le biais de l'aluminium qui entre dans la composition d'un panneau photovoltaïque³⁶ ; il est également utilisé pour l'installation des modules et des systèmes PV. Au total, pour chaque kWc³⁷ de modules produits, il faut 17 kg d'aluminium pour fabriquer les onduleurs et les supports photovoltaïques (Liang, 2012).

Dans un contexte où la demande d'aluminium, que l'UE importe largement de l'étranger, est en constante augmentation tirée par la transition énergétique mondiale, la concurrence pour l'approvisionnement risque d'être intense (KU Leuven, 2022).³⁸ En dépit de la domination de la Chine qui représente plus de 60% de l'offre mondiale d'aluminium, l'Union Européenne dispose d'un

³⁴ « PvTBC potentiel devra prendre des décisions difficiles sur les questions suivantes: les séparations des matières et la pureté des matières récupérées, les structures de revenus des procédés de recyclage actuels et futurs en ce qui concerne la volatilité du prix du marché des matériaux/composants, les coûts associés au traitement, les coûts macro logistiques et les coûts environnementaux externes (p. ex., les frais de déversement des sites d'enfouissement) et les avantages (p. ex., éviter les risques liés à la gestion des déchets) » de Choi, Fthenakis, 2014

³⁵ Approximativement 20 kt selon Choi, Fthenakis, 2014 et Kastanaki, Giannis, 2022

³⁶ L'aluminium est l'un des principaux composants des modules, avec environ 15kg, pour environ 427g de cellules photovoltaïques (Liang, Zhang, Yang, Li, Xu, 2017).

³⁷ Le Kilowatt-crête (kWc) décrit la puissance maximale en kilowatts que peut produire une installation PV. Elle est principalement utilisée à des fins de comparaison entre différents systèmes.

³⁸ La demande en aluminium de l'UE devrait augmenter de 33% entre 2020 et 2050 (KU Leuven, 2022). De plus, en 2050, son importation devrait vraisemblablement passer de 4.2 Mt à 5 Mt, représentant plus du quart de la demande européenne d'aluminium (KU Leuven, 2022).

approvisionnement diversifié, moins de 10% des importations provenant de Chine. C'est pourquoi, l'aluminium n'est pas considéré comme une ressource stratégique sous dépendance étrangère par la Commission Européenne (Commission Européenne, 2021).

La transition environnementale à l'œuvre en Europe devrait cependant intensifier les contraintes pesant sur l'industrie métallurgique faisant courir le risque d'une dégradation de la compétitivité-prix d'une industrie déjà en sursis. Cette dégradation pourrait avoir pour conséquence une hausse des importations étrangères d'aluminium, augmentant encore la dépendance à l'étranger. De plus, de nombreux pays producteurs appliquent des normes environnementales moins exigeantes si bien que leur bilan carbone est 2,5 fois plus élevé que celui de l'aluminium européen (KU Leuven, 2022). Un mécanisme visant à favoriser l'industrie métallurgique européenne permettrait à la fois de satisfaire les objectifs de sécurisation et de transition environnementale de la chaîne de valeur (Commission Européenne, 2021).

Bien que ce mécanisme soit bénéfique pour l'industrie métallurgique européenne et donc par ricochet pour la filière photovoltaïque dans la mesure où il est un garde-fou contre toute dépendance dans l'approvisionnement pour la filière, le MACF pourrait avoir des effets difficilement estimables sur les coûts de production de la filière. En effet, actuellement la filière comble une partie de ses besoins en aluminium à l'étranger à un prix plus bas, lui permettant ainsi d'acquérir une certaine compétitivité-prix. Certains modèles prédisent que la mise en œuvre du MACF aurait pour effet secondaire de rééquilibrer les importations et les exportations d'aluminium. L'Union au lieu d'exporter une partie de sa production, la redirigerait vers une consommation domestique et en importerait mécaniquement moins (Lim, Hong, Yoon, Chang, Cheong, 2021). Cependant, le MACF pourrait rendre cet approvisionnement étranger plus cher, augmentant par conséquent, le prix final du photovoltaïque européen, ce qui dégraderait la compétitivité prix de la filière européenne dans la concurrence internationale, mettant alors en difficulté tous les efforts entrepris visant restaurer les fonctions productives de la filière. Le MACF pourrait donc avoir les effets contraires à ceux escomptés dans certains secteurs.

- [Un MACF réformé qui serait applicable aux PV étrangers, outil industriel majeur pour protéger le PV européen d'une concurrence déloyale](#)

Bien que le MACF en l'état actuel puisse avoir des effets industriels contradictoires sur la filière photovoltaïque, ce mécanisme prétend inciter les producteurs étrangers à intégrer/internaliser les externalités négatives en appliquant des normes environnementales comparables à celles de l'Union. Une telle incitation serait la bienvenue pour l'environnement à l'échelle globale d'une part et pour l'industrie à l'échelle de l'Union Européenne d'autre part. La puissance de l'incitation qu'induit le MACF dépend directement de l'attractivité du marché unique et de la dépendance du reste du monde vis-à-vis de celui-ci. Cette implication s'inscrit pleinement dans la théorie du *Brussels Effect* (Bradford, 2019), selon laquelle l'Union Européenne disposerait d'un pouvoir réglementaire unilatéral, externalisant *de facto* (mais pas nécessairement *de jure*) ses lois en dehors de ses frontières par le biais de mécanismes de marché. Si le premier marché d'un producteur étranger est l'Union Européenne, qui se caractérise par des normes plus exigeantes par rapport aux autres Etats, le producteur étranger aura intérêt, par soucis d'économies d'échelles, à fabriquer tous ses produits aux standards européens, même pour ses marchés extra-européens dans la mesure où des produits aux standards européens ne lui ferment aucun marché étranger. Ainsi, le MACF pourrait engendrer cet effet dont la conséquence directe serait des produits venant de l'étranger qui seraient moins intenses en carbone.

Concernant l'incidence sur le prix, une application généralisée pourrait avoir pour effet d'augmenter le prix mondial moyen de l'aluminium et donc le prix mondial moyen d'un module photovoltaïque ce qui permettrait à l'Union de maintenir sa compétitivité-prix. Cependant, cette hausse

du prix mondial est hypothétique. En effet, la Chine dispose de capacités de production très conséquentes et donc de marges d'économies d'échelles toutes aussi importantes. Pour cette raison, le pays pourrait intégrer une réglementation environnementale plus stricte sans engendrer de hausse des coûts de production et, à terme, obtenir un prix plus bas que celui pratiqué actuellement. Pour l'industrie photovoltaïque européenne, cela pourrait être une bonne chose dans la mesure où elle aurait accès à de l'aluminium à un coût plus avantageux, ce qui lui permettrait de faire baisser le prix final de ses produits ou de ne pas l'augmenter.

Cependant, ces effets ne pourraient être que théoriques si le MACF se révélait insuffisamment incitatif pour le reste du monde, il ne viendrait que compliquer la réindustrialisation de la filière. C'est pour cela qu'une réforme du MACF pourrait prévoir son élargissement aux produits intégrant un certain pourcentage d'aluminium et de métal. Ainsi, le secteur photovoltaïque européen pourrait être durablement protégé dans la mesure où il est deux fois moins intense en carbone qu'un photovoltaïque étranger (IEA, 2022).

L'autre piste d'amélioration serait d'adopter des mesures incitatives complémentaires comme une meilleure prise en compte du coût environnemental dans les appels d'offres pour des projets d'installation (Colloque chaire VITE, 2020). L'augmentation du coefficient des critères environnementaux permettrait de favoriser les panneaux photovoltaïques européens plus onéreux mais à moindre contenu en carbone que les produits chinois.

- [Le devoir de vigilance européen, un outil soft au service d'une concurrence plus équitable avec les opérateurs étrangers.](#)

Un autre outil aux effets plus implicites mais tout aussi puissants, devrait prochainement être mis en place, le devoir de vigilance européen³⁹. Par devoir de vigilance, il faut entendre l'obligation des entreprises ayant une activité à l'étranger de veiller à ce qu'un standard exigeant en matière de protection de l'environnement et de conditions de travail soit respecté par leurs sous-traitants. Généralement ce devoir de vigilance est accompagné d'un volet contentieux. Ainsi, la société mère qui a commis des fautes personnelles se voit reconnaître responsable des dommages environnementaux nés sous sa sphère d'influence. Ici la faute personnelle n'est pas la violation en elle-même du sous-traitant mais le défaut de vigilance, défaut dans son obligation de prévention dans sa sphère d'influence, auprès de ses filiales et de ses sous-contractants. À l'heure actuelle, le champ d'application matériel de ce projet de directive va bien au-delà de celui de l'obligation française⁴⁰ ou allemande, car il concerne toutes les sociétés européennes à responsabilité limitée de grande taille⁴¹ et les entreprises de pays tiers, actives dans l'UE, répondant aux seuils de chiffre d'affaires fixés par la Commission.

Le devoir de vigilance pourrait devenir un outil de réindustrialisation de la filière photovoltaïque dans la mesure où il viendrait renchérir le coût d'une externalisation de la production du fait de notamment de l'implémentation de procédures de surveillance des sous-contractants. Si la plupart des producteurs de filière photovoltaïque européenne échapperaient à cette obligation car il s'agit principalement de PME, elle serait opposable aux grandes entreprises chinoises du photovoltaïque qui dominent le marché mondial et européen (EDF, 2021) et qui seraient établies sur le marché intérieur. Ainsi pour pouvoir vendre en Europe, les entreprises chinoises devront investir pour assurer la qualité environnementale de leurs chaînes de valeur, engendrant des coûts qui pourraient se répercuter sur le prix final. Une telle situation favoriserait la filière photovoltaïque européenne.

³⁹ Proposition de directive du parlement européen et du conseil sur la diligence raisonnable en matière de durabilité des entreprises et modifiant la directive (UE) 2019/1937.

⁴⁰ Loi du 27 mars 2017 qui crée un devoir de diligence pour les sociétés mères

⁴¹ Employant plus de 500 personnes et réalisant un chiffre d'affaires net supérieur à 150 millions d'euros à l'échelle mondiale

Néanmoins, cet instrument qui rendrait les délocalisations moins attractives, pourrait se révéler à double tranchant. En effet, les PME européennes pourraient se voir appliquer cette obligation à partir du moment où elles s'inscrivent dans une chaîne de contrats avec une grande entreprise soumise à cette obligation, comme un grand installateur ou exploitant (par exemple EDF ou ENEL). Ce coût de surveillance pour les PME pourrait alors représenter un coût économique non-négligeable.

La structure de la filière devrait toutefois permettre de limiter les effets négatifs de cette mesure. En effet, l'amont de celle-ci et, tout particulièrement le segment de la production de poly silicium est dominé par une grande entreprise, Wackler, qui dispose des moyens techniques, financiers et humains pour exercer de tels contrôles vis-à-vis de ses sous-contractants extracteurs. Les clients de cette entreprise subiront par conséquent des coûts de surveillance moins élevés car déjà internalisés par Wackler. Il en est de même si les PME européennes notamment les PME qui assemblent des modules, se fournissent avec des composants chinois comme des plaquettes ou des cellules⁴², ces segments dominés par de grandes entreprises chinoises sont-elles aussi soumises à cette obligation de vigilance.

Ainsi pour résumer l'industrie photovoltaïque européenne en ayant pour fournisseurs principalement de grandes entreprises directement soumises au devoir de vigilance, ne supportera pas forcément des coûts de surveillance insurmontables. Néanmoins, conscients de cette conséquence négative, la Commission et les colégislateurs (Parlement Européen et Conseil) discutent actuellement de la mise en place d'un fonds pour aider les PME à appliquer cette obligation.

Innover et moderniser la chaîne de valeur

L'innovation contribue à l'atteinte de trois objectifs des nouvelles politiques industrielles : compétitivité, verdissement et sécurisation des approvisionnements. C'est pourquoi les pouvoirs publics doivent mobiliser des ressources pour que la filière photovoltaïque européenne se différencie des modules photovoltaïques chinois grâce à des rendements plus élevés ou d'une durabilité plus longue (innovation de produit) ou la réalisation de gains de productivités pour améliorer la compétitivité-prix (innovation de processus). De nombreuses technologies émergentes⁴³ sont prometteuses mais restent chères par rapport à la technologie cristalline qui bénéficie d'une longue courbe d'apprentissage (Ministère de la Transition écologique, 2020).

Parallèlement, l'innovation est aussi un moyen d'améliorer les performances environnementales de la chaîne de valeur en réduisant l'intensité carbone. L'objectif est ici de maximiser l'externalité positive et de minimiser l'impact négatif d'une activité économique (Arrow 1962) car l'entité qui maîtrise la technologie la moins intense en carbone sera privilégié par les pouvoirs publics ou les particuliers sous condition d'une sensibilité au prix plutôt faible et un intérêt pour les aspects hors-prix. Enfin, les innovations peuvent permettre de sécuriser la chaîne de valeur, par exemple en favorisant une écoconception optimisant le recyclage ou en diversifiant l'approvisionnement grâce à la découverte de substituts.

Ainsi, la modernisation perpétuelle de la chaîne de valeur est l'ultime moyen de renforcer une chaîne de valeur nouvellement reconstituée. Cela implique notamment de favoriser la recherche tant privée que publique, objectif visé par le programme Horizon Europe et les programmes de recherche nationaux. Mais la difficulté pour le photovoltaïque européen est que la filière reste essentiellement

⁴² Il pourrait en aller de même pour les PME européennes assemblant des modules qui achètent des composants (plaquettes ou des cellules) chinois ce qui restera le cas même si l'industrie du PV européenne se développait de nouveau. Également concernées par l'obligation de vigilance, les grandes entreprises chinoises devront s'y soumettre, allégeant ainsi la charge du contrôle à assurer par les PME européennes.

⁴³ Il s'agit des couches minces ou des cellules tandems (Ministère de la transition écologique, 2020).

constituée de PME dont les dépenses de R&D sont inférieures à celles des grands groupes. C'est pourquoi la recherche publique doit occuper une place structurante dans les domaines fondamentaux et appliqués. Sur les segments développement et innovation, cela passe par des partenariats entre les centres de recherche et les entreprises soit à l'échelle européenne par exemple dans le cadre d'alliances européennes et de PIIEC (Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, Iris, 2020), soit de manière plus territorialisée avec la création de clusters rapprochant industriels, universités et instituts de recherche.

A supposer que cette étape soit structurée, il restera à s'assurer de la diffusion de l'innovation et l'accès des acteurs de la filière aux nouveaux produits et procédés ce qui soulève la question de la pré-commercialisation et de la démonstration. Pour relever ce défi, l'Union Européenne a lancé un fonds pour l'innovation dont l'objectif est de favoriser la démonstration d'innovations bas carbone dans le cadre de grands et petits projets. Dès à présent, on peut constater les premiers effets du fonds pour la filière par la construction financée d'une Gigafactory de cellules et modules photovoltaïques hétérojonction à Catane⁴⁴, cellules plus performantes que celles au silicium multicristallin. Cet instrument pourrait contribuer à la diffusion d'innovation dans une filière en cours de constitution. Il se rapproche d'un fonds mis en place en Chine dans les années 2010 pour favoriser l'innovation dans la filière photovoltaïque (Corwin, Johnson 2019).

Conclusions et recommandations

La conclusion que l'on peut tirer de cette étude est que la politique de réindustrialisation de la filière photovoltaïque s'inscrit indubitablement dans le cadre des nouvelles politiques industrielles et en constitue l'un de ses meilleurs exemples en associant un objectif industriel à l'impératif de la transition écologique. L'objectif de restauration des fonctions productives de cette filière doit tenir compte des caractéristiques du tissu d'entreprises dominé par les PME et de la part variable des fonctions de fabrication selon les segments de la chaîne de valeur. Ces deux caractéristiques conditionnent la forme de l'action publique à entreprendre, la diversité des acteurs concernés, des objectifs visés et des modes d'organisation des entreprises exige, plus que pour d'autres domaines stratégiques plus cohésifs, un important effort de concertation entre les parties prenantes.

Pour stimuler l'investissement matériel et immatériel, une planification concentrée à l'échelle européenne est indispensable. L'alliance pour le photovoltaïque et le PIIEC récemment initiés en constituent l'armature. En complément à cette planification concertée, émanant directement des acteurs de la filière, les PME en présence se voient offrir un accès aux soutiens financiers de l'Union Européenne afin de trouver plus facilement les ressources nécessaires à la reconstitution des conditions de production et la relance de projets innovants. Ces facilités financières offertes aux entreprises en contrepartie de l'engagement dans un programme de reconstruction de leurs capacités productives correspondent parfaitement à la nature même de la filière photovoltaïque et à sa place dans le processus de transition écologique.

La reconstruction de la filière repose aussi sur le renouvellement et le renforcement des compétences. Cela passe par la mise en place d'actions en faveur de la formation initiale et continue des travailleurs grâce à l'activation d'outils collaboratifs, concernant soit seulement les entreprises, soit en associant l'Etat à travers les opérateurs publics de formation. L'objectif final de telles actions est la constitution de pôles de spécialisation cognitive tant à l'échelle locale qu'européenne afin que la filière photovoltaïque non seulement retrouve les compétences perdues, mais aussi acquière un avantage comparatif par rapport aux concurrents étrangers.

⁴⁴ Cf. *supra*. p. 11.

Ces dispositifs immédiatement mobilisables doivent s'inscrire dans une vision de long terme qui permette aux opérateurs d'inscrire leurs propres projets dans une stratégie globale. Le renforcement d'une industrie de la transition écologique en Europe doit ainsi être adossé à la définition d'objectifs et la mise en place d'actions de sécurisation des approvisionnements et de verdissement de la chaîne productive. De ce point de vue également, la méthode collaborative est de mise tout particulièrement pour ce qui concerne l'indépendance des différents segments de la chaîne de valeur dont la définition et les modalités d'atteinte nécessiteront une étroite coopération entre pouvoirs publics et acteurs industriels. Il en va de même de la bifurcation vers un modèle plus respectueux de l'environnement par l'adoption de procédés de production plus propres et plus sobres de la part des principaux acteurs de la chaîne de valeur. L'amont de la filière, notamment la partie fabrication du silicium, est particulièrement concerné par cette problématique qui appelle la définition de normes s'appliquant aux méthodes d'extractions des matières premières et la création d'incitations ou de règles permettant le développement de processus de recyclage moins carbonés. Plus en aval de la filière, l'augmentation de la qualité environnementale des produits offerts doit aussi être affirmée comme un objectif majeur pour l'Union européenne afin de diriger les producteurs de panneaux vers l'offre de produits plus respectueux de l'environnement. Dans ce domaine, l'élaboration d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières ou d'un devoir de vigilance européen pourraient constituer des signaux clairs de la part des décideurs publics. On le voit, le retour de l'industrie photovoltaïque en Europe ne pourra s'accomplir qu'au prix d'une politique globale combinant des considérations industrielles, énergétiques et environnementales. Cette approche globale exige des efforts d'innovation de la part des institutions et des décideurs publics. En effet, si une politique industrielle fondée sur les collectifs de production doit être élaborée, il est impératif que les outils et dispositifs sur lesquels elle s'appuie intègrent cette dimension. En mettant au premier plan de la politique industrielle des projets collectifs conduits par des structures représentant des filières, la politique industrielle prendrait tout son sens. Elle aurait aussi pour conséquence d'en élargir la portée en remettant l'Etat en position d'organisateur de l'économie en partenariat avec les forces vives du pays.

Références

- Acemoglu, D., Autor, D., Dorn, D., Hanson, G., & Price, B. (2014). Return of the Solow paradox? IT, productivity, and employment in US manufacturing. *American Economic Review*, 394–399.
- Aghion, P., Hepburn C., Teytelboym A., Zenghelis D. (2019), Path dependence, innovation and the economics of climate change, in *Handbook on Green Growth*, Edward Elgar Publishing
- Aiginger, K., Böheim, M. (2015), *Fostering sustainable economic growth by redefining competitiveness and industrial policy: Toward a systemic approach aligned with beyond-GDP goals*. UN Global Sustainable Report.
- Aït Razouk, A. (2014), Mobilisation des ressources humaine et innovation des PME. *Revue française de gestion*, 2014/6, n° 243, p. 107-126.
- Albert (E.) (2020) Le spectre de la déflation plane à nouveau sur la zone euro, *Le Monde*, septembre.
- Altenburg T., Rodrik D. (2017), *Green industrial policy: Accelerating structural change towards wealthy green economies*, Green Industrial Policy, UN Report.
- André, C. (2019), De la mise à disposition des salariés par un groupement d'employeurs : approche pratique. Etude, *Droit social*, n° 2, p. 130.

- Asdrubali P., Signore S. (2015), *L'impact économique des garanties de l'UE sur le crédit aux PME*. Documents de travail sur l'économie européenne, n° 2, Commission européenne.
- Beffa J-L. (2012) *La France doit choisir*, Paris, Seuil.
- Bonnet T., Grekou K., Hache E. et Mignon V. (2022) *Métaux stratégiques : la clairvoyance chinoise*, Note du CEPII n° 428, juin.
- Bost F. (2015), Les relocalisations industrielles en France : épiphénomène ou tendance de fond?, *La revue géographique de l'Est*, p. 480-494.
- Bost F. (2017), La désindustrialisation, objet géographique in Les pays européens à l'épreuve de la désindustrialisation, une approche comparative, *La revue géographique de l'Est*.
- Bridge G., Bouzarovski S., Bradshaw M., Eyre, N. (2013) Geographies of energy transition: Space, place and the low-carbon economy, *Energy Policy*, 53, pp. 331-340
- Broussolle D. (2021), Les enjeux économiques d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'UE, *Bulletin de l'Observatoire des politiques économiques en Europe*, n° 44.
- Capello R., Cerisola S. (2022), Regional reindustrialization patterns and productivity growth in Europe, *Regional Studies*, p. 13 (<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00343404.2022.2050894>)
- Čadil J., Mirošník K., Rehák J. (2017), The lack of short-term impact of cohesion policy on the competitiveness of SMEs, *International Small Business Journal*, pp. 991-1009.
- Cantwell A., Piscitello L. (2015), New Competence Creation in Multinational Company Subunits: The Role of International Knowledge, *The World Economy*, Vol. 38, Issue 2, pp. 231-254.
- Christopherson, S., Martin, R., Sunley, P., & Tyler, P. (2014), Reindustrialising regions: Rebuilding the manufacturing economy? *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 7(3), 351–358.
- Choi JK., Fthenakis V. (2014), Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives, *Journal of Cleaner Production*, 66: 443-449.
- Colovic A. (2019), Cluster connectivity and inter-cluster alliance portfolio configuration in knowledge-intensive industries, *M@n@gement*, vol. 22, no. 4, pp. 619-635.
- Communications COM (2011) 25 final, COM (2014) 297 final et COM (2017) 490 final
- Communication grand public de la Commission, « Plan d'investissement pour l'Europe : Bilan », juillet 2018, https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/juncker-plan-factsheet-july2018_fr.pdf [consulté le 20 avril 2022].
- Communication de la Commission, « Une nouvelle stratégie industrielle pour l'Europe », COM(2020) 102 final du 10 mars 2020.
- Communication de la Commission, « Mise à jour de la nouvelle stratégie industrielle de 2020: construire un marché unique plus solide pour soutenir la reprise en Europe », COM(2021) 350 final du 5 mai 2021.
- Communication de la Commission, « Résilience des matières premières critiques : la voie à suivre pour un renforcement de la sécurité et de la durabilité », COM(2020) 474 final du 3 septembre 2020.
- Communication de la Commission, « Ajustement à l'objectif 55: atteindre l'objectif climatique de l'UE à l'horizon 2030 sur la voie de la neutralité climatique », Bruxelles, COM(2021) 550 final du 14 juillet 2021.

- Commission Communication de la Commission « Plan REPowerEU », COM(2022) 230 final du 18 mai 2022.
- Corwin S., Johnson T. (2019), The role of local governments in the development of China's solar photovoltaic industry, *Energy Policy*, 130, pp 283-293.
- Crague, G. 2019. « Maintenir l'industrie dans une ville moyenne. L'opération CIRIAM/Normand'Innov à Flers », in G. Crague (dir.), *Faire la ville avec l'industrie*, Paris : Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Devoluy M., Koenig G. (2015), *Les politiques économiques européennes*, Point, p. 428
- Docquier F., Hillel Rapoport. (2012), Globalization, Brain Drain, and Development, *Journal of Economic Literature*, 50(3), pp. 681-730.
- Du Fayet de la Tour A. (2012), *Economic analysis of the photovoltaic industry: globalisation, price dynamics, and incentive policies*, Mines Paris Tech.
- Fernández-Serrano, J, Romero, I (2014) European cohesion policy and the promotion of entrepreneurship: the case of Andalusia, *Journal of Regional Research*, pp. 215-236.
- Finon D. (2008), *L'inadéquation du mode de subvention du photovoltaïque à sa maturité technologique*, CIRED - centre international de recherche sur l'environnement et le développement.
- Garsten, C. (2003). Colleague, competitor, or client: Social boundaries in flexible work arrangements. In Paulsen (N.) & HERNES (T.) (Eds.), *Managing Boundaries in Organizations: Multiple Perspectives*, Basingstoke, Palgrave Macmillan, p. 244-261
- Gianfranco E., Atzeni O., Carboni A. (2008), The effects of grant policy on technology investment in Italy, *Journal of Policy Modeling*, 30(3), pp. 381-399
- Granier C., Ellie P. (2021), *Ces territoires qui cherchent à se réindustrialiser*, La fabrique de l'industrie, Paris, Presses des Mines.
- Grau T., Molin H., Neuhoff K. (2012), Survey of photovoltaic industry and policy in Germany and China, *Energy Policy*, Volume 51, pp 20-37.
- Gregoir L. (2022), *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe's raw materials challenge*, POLICYMAKER SUMMAR, KU Leven, p. 28
- Göllei A., Görbe P. (2012), A Magyar Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems, *Journal of Clean Production*, pp. 138-145.
- Goodrich A., Hacke P. (2013), A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics roadmap: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs, *Solar Energy Mater. Sol. Cells*, 114, pp. 110–135.
- Hartsenko J., Sauga A. (2012), *Does financial support from the EU structural funds has an impact on the firms' performance: evidence from Estonia*, Proceedings of 30th International Conference Mathematical Methods in Economics (ed Ramik, J, Stavarek, D), 11-13 septembre 2012, pp.260-265.
- Hamouda K., Tkouti A., Mouss M., Hamouda C., Malek A. (2012), Analyse technique et économique de recyclage des modules photovoltaïques, *Journal of Renewable Energies*, vol. 15, pp. 331 – 350.
- Huang P.et Liu Y. (2017) Renewable Energy Development in China: Spatial Clustering and Socio-Spatial Embeddedness, *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, volume 4, pp. 38–43

- IEA (2022) *Special Report on Solar PV Global Supply Chains*. Disponible en ligne : <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains/executive-summary>
- IRENA (2016), *End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels*, Report.
- IRENA (2021), *Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2021*, Report.
- Jacob R. (2013), L'équipe composite ou comment une main d'œuvre mixte collabore au sein d'une entreprise ?, *Annales des Mines-Gérer et comprendre*, p. 17-28.
- Krugman P., Obstfeld M. (1991), *International economics: Theory and policy*, Global edition, p. 785
- Kastanaki E., Giannis A. (2022), Energy decarbonisation in the European Union: Assessment of photovoltaic waste recycling potential, *Renewable Energy*, Volume 192, pp. 1-13.
- Le Borgn' P-Y. « Chine : Il n'est pas sain que la production mondiale de panneaux solaires ne dépende à ce point d'un seul pays », *Le Monde*, 15 juin 2021.
- Lethielleux L. (2018), Les Groupements d'employeurs : vers un nouveau développement de la gestion des ressources humaines territoriale ? *Gérer & Comprendre -Annales des Mines*, (132), p. 3-10.
- Lethielleux L., André C. (2019), Les enjeux de la mise à disposition des salariés des groupements d'employeurs pour les TPE/PME, *@GRH*, 2019/4 (n° 33), p. 149-169.
- L'Heudé W., Chailloux M., et Jardi X. (2021), Un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières de l'Union européenne, *Trésor Eco* n° 280.
- Landesmann M., Stöllinger R., (2020) The European Union's Industrial Policy: What are the Main Challenges?, *wiiw Policy Note/Policy Report No. 36*, p. 26.
- Liang X., Zhang S., Yang M., Li W., Xu J. (2017), Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011–2016: A life cycle assessment approach, *Journal of Cleaner Production*, 170, pp. 310-329.
- Lim, B., Hong K., Yoon J., Chang, J-I., Cheong I. (2021), Pitfalls of the EU's Carbon Border Adjustment Mechanism, *Energies*, 14, 7303.
- Lipinska, K., « The Absorption of Structural Funds for R&D by SMEs in Pomorskie - Do Institutional Conditions Make a Difference? », *EstIF*, 2018/2, p. 169-178.
- Lorenzen, M. & Mudambi, R. (2013). Clusters, Connectivity and Catch-up: Bollywood and Bangalore in the Global Economy. *Journal of Economic Geography*, 13 (3), 501-534.
- Maryland State Department of Education (2007), *"Maryland Career Clusters: Restructuring Learning for Student Achievement in a Technologically, Advanced, Global Society"* State Department of Education
- Ministère de l'Économie (2016) PLAN JUNCKER » EN FRANCE : BILAN 2015, PERSPECTIVES, Rapport, p. 6
- Ministère de la transition écologique. (2020), *Le photovoltaïque : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles*, Plan de programmation des ressources minérales de la transition bas carbone, Rapport.
- Ministère de la transition écologique (2021), *Chiffres clés du climat France, Europe et Monde*, Rapport DATA LAB, p. 38.
- Mouhoud, E. (2017), *Mondialisation et délocalisation des entreprises*, Paris : La Découverte, p. 128.

- Müller A., Friedrich L., Reichel C., Herceg S., Mittag M., Holger Neuhaus D., (2021) A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 230, 111277. Disponible en ligne : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024821003202>
- Nickell, S., Redding, S., et Swaffield, J. (2008), *The uneven pace of deindustrialization in the OECD*, OECD Report.
- Ludin NA., Mustafa NI., Hanafiah MM., Ibrahim MA., Mat Teridi M., Sepeai S., Zaharim A., Sopian K., (2018), Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, (C), 11-28
- Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques, (2020), *L'alliance européenne des batteries : enjeux et perspectives européennes*, Iris, p. 105.
- Ouraga, B. (2016), *Analyse comparative des déterminants de la déflation au Japon et en zone Euro*, Louvain School of Management, p. 83
- Owen-Smith, J., Powell, W.W. (2002). Knowledge Networks as Channels and Conduits: The Effect of Formal Structure in the Boston Biotechnology Community. *Organization Science*, pp. 5-21.
- Ovatt S., Mirletz H., Seetharaman S., Barnes T. (2021), PV in the circular economy, a dynamic framework analyzing technology evolution and reliability impacts, *Isciences*.
- Pasimeni F. (2017), *EU energy technology trade: Import and export*, Publications Office of the European Union, JRC107048 : kjna28652enn.pdf
- Pinder J. (1982), Causes and kinds of industrial policy, *National Industrial Strategies and the World Economy*, London, p. 41-52.
- Ramos R., Suriñach J., Artís M. (2009), *Human capital spillovers, productivity and regional convergence in Spain*, Grup d'Anàlisi Quantitativa Regional (AQR-IREA), University of Barcelona, Department of Econometrics, Statistics and Spanish Economy.
- Reich R. (1982), Making industrial policy", *Foreign Affairs*, pp. 852–881.
- Rodrik D. (2014), Green industrial policy, *Oxford Review of Economic Policy*, Volume 30, Number 3, 2014, pp. 469–491.
- Rowthorn R., Ramaswamy R. (1997), *Deindustrialization: Causes and implications*, IFM Report.
- Sant P. (2014), *Is Juncker's Investment Plan the Silver Bullet for the EU ?*, ESTIF, pp. 289-296.
- Smith B., Woodhouse M., Feldman D., Margolis R. (2019), Solar Photovoltaic (PV) Manufacturing Expansions in the United States, 2017–2019: Motives, Challenges, Opportunities, and Policy Context, NREL, p. 88.
- Solar Power (2021), *Global Market Outlook for Solar Power 2021 – 2025*, Solarpower Europe.
- Solar Power (2021), *EU Solar Jobs Report 2021 Towards Higher Solar Ambitions in Europe*. Disponible en ligne : <https://www.solarpowereurope.org/insights/thematic-reports/eu-solar-jobs-report-1>
- Solow R. (1956), A Contribution to the Theory of Economic Growth, *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, n° 1, 1956, pp. 65–94.
- Sternberg R. (2012), Do EU regional policies promote regional entrepreneurship? Empirical evidence from Spain and Germany, *European Planning Studies*, pp. 583-608.

- Tagliapietra S., Veugelers R. (2020), *A green industrial policy for Europe*, Bruegel Blueprint, Brussels, Belgium.
- Tödtling-Schönhofer H., Hamza C., Resch A. (2011), *Impact and Effectiveness of the Structural Funds and EU Policies Aimed to SMEs in Regions*, Parlement européen, Bruxelles.
- Vogel, L. (2020) « Aides d'État compatibles - Article 107, § 2 et 3, TFUE » in *Commentaire Concurrence I*, 1e édition, Bruxelles, Bruylant, p. 470-529.
- Weckend, S., Wade, A., and Heath, G.A. (2016). End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. NREL/TP-6A20-73852, 1561525 (IRENA). NREL/TP-6A20-73852, 1561525.
- Weller, S., O'Neill, P. (2014). De-industrialisation, financialisation and Australia's macro-economic trap. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, pp. 509–526.
- Włodarczyk, R. (2022) *Analysis of the Photovoltaic Waste-Recycling Process in Polish Conditions—A Short Review*. Sustainability. (<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4739>)
- Xiong Yongqing Yang Xiaohan (2016), Government subsidies for the Chinese photovoltaic industry, *Energy Policy*, Volume 99, pp. 111-119.
- Yi J. (2016), *Les politiques de développement du solaire photovoltaïque et leurs impacts sur les dynamiques des technologies et des marchés*, Thèse de doctorat, Université Paris Dauphine.
- Zimmermann B. (2006), Les groupements d'employeurs : la sécurité dans la flexibilité ? *Sociologie du Travail*, n° 48.