Note en réaction au rapport du Haut-Commissariat au Plan " Electricité : le devoir de lucidité " du 23 mars 2021

Philippe Blanc, Romain Besseau

▶ **To cite this version:**

Philippe Blanc, Romain Besseau. Note en réaction au rapport du Haut-Commissariat au Plan " Electricité : le devoir de lucidité " du 23 mars 2021. 2021. hal-03228766

HAL Id: hal-03228766

https://minesparis-psl.hal.science/hal-03228766

Preprint submitted on 18 May 2021

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.

Note en réaction au rapport du Haut-Commissariat au Plan « Electricité : le devoir de lucidité » du 23 mars 2021

Date : 29 avril 2021

Auteurs :

Prof. Philippe Blanc, Directeur de recherche
Dr. Romain Besseau, Chercheur post-doctorant

Centre Observation, Impacts, Energie,
Département Energétique et Procédés
MINES ParisTech, PSL Research University

Préambule

Le 23 mars 2021, le Haut-Commissariat au Plan a édité un rapport intitulé « *Electricité : le devoir de lucidité* »[1] composé d'une première partie de prise de position de 12 pages signée de M. François Bayrou, Haut-commissaire au plan, puis d'une deuxième partie de 25 pages venant étayer et préciser la première partie.

Sans prendre parti sur le rôle et la part du nucléaire dans la transition énergétique –en dehors du cœur de notre champ d'expertise professionnelle–, nous relevons hélas dans ce rapport des modes de raisonnements orientés, de citations partielles de rapports et d'arguments souvent biaisés, à charge contre les énergies renouvelables, et parfois allant jusqu'à affirmer à l'encontre de ces dernières des états de fait totalement inexacts. La mission du Haut-Commissariat au Plan est notamment « *d'éclairer les choix des pouvoirs publics au regard des enjeux démographiques, économiques, sociaux, environnementaux, sanitaires, technologiques et culturels* »[2], il n'est pas de jeter des zones d'ombre sur un pan entier de la filière énergétique, renouvelable et à faible empreinte carbone.

C'est la raison pour laquelle nous souhaitons contribuer à rétablir certaines vérités contredites énoncées dans ce rapport et nuancer certains propos de façon à que ce dernier soit conforme à « *une discussion publique, sincère et efficace* » évoquée page 7 et à cette « *lucidité* » effectivement nécessaire dans le débat sur l'énergie qu'appellent de leurs vœux ses auteurs.

Enfin, comme le souligne M. Bayrou lors de son discours devant le Conseil économique, social et environnemental sur sa méthode et son agenda de travail[3], « *nous sommes devant une obligation, qui a été largement traitée par l'accord de Paris de rendre notre développement compatible avec les équilibres subtils qui devraient protéger le climat et la biodiversité* ».

[1] Haut-commissariat au Plan, 2021. Electricité : le devoir de lucidité, 27 pages. (https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2021/04/electricite_le_devoir_de_lucidite_0.pdf, lien accédé le 29 avril 2021).
[2] https://www.gouvernement.fr/haut-commissariat-au-plan (lien accédé le 20 avril 2021)
[3] https://www.gouvernement.fr/sites/default/files/contenu/piece-jointe/2020/10/2020.09.22_discours_au_cese_version_prononcee.pdf (lien accédé le 20 avril 2021).

La question de l'empreinte carbone (*i.e.* des émissions de gaz à effet de serre) n'est donc pas la seule à prendre en compte dans les *travaux de planification et de réflexions prospectives* pour établir notre transition énergétique et écologique. Les impacts environnementaux relatifs aux écosystèmes, à la santé humaine et à l'utilisation ou l'épuisement de ressources au sens large sont également à considérer. Il en est de même pour la question des risques associés aux différentes filières. Ces considérations poussent notamment à réfléchir non seulement aux moyens et aux ressources pour la production d'énergie, mais aussi, en amont, aux moyens de moins –*sobriété*– et de mieux –*efficacité*– la consommer.

Pour résumer, L'objet de cette note n'est donc pas de prendre position pour ou contre le nucléaire ou même de mener une revue critique complète du rapport, mais d'y contribuer, en mettant en exergue des éléments hélas contestables, voire factuellement inexacts, de ce dernier, relevant de notre champ d'expertise sur les impacts environnementaux des énergies renouvelables ainsi que sur l'énergie solaire.

Nous avons choisi de lister nos différents commentaires globalement dans l'ordre de lecture du rapport :

- Page 2 : objectifs de la transition énergétique 3
- Page 3 : des oublis sur le bouquet énergétique futur pour le chauffage des logements 3
- Pages 6-7 : le bilan carbone du photovoltaïque en question 4
- Page 6 : la consommation de superficies en terres arables et boisées du photovoltaïque 5
- Page 8 : l'artificialisation des sols 7
- Page 10 : l'intégration du PV en courant continu 8
- Pages 10-11 : le danger d'un repli social lié au développement de l'autoconsommation locale 9

▪ Page 2 : objectifs de la transition énergétique

Pour commencer, nous souscrivons parfaitement avec le paragraphe suivant :

> La substitution de sources d'énergie non carbonées aux sources d'énergie dépendant de carburants fossiles est donc devenue un chapitre essentiel de l'évolution de nos sociétés et de nos économies. C'est dans ce contexte que la question de la consommation et de la production d'électricité est devenue une question centrale du débat énergétique.

L'objectif poursuivi est bien la réduction de l'empreinte carbone de notre système énergétique, et non seulement du bouquet électrique. Nous insistons, comme évoqué dans le préambule sur l'importance de considérer également d'autres catégories d'impacts environnementaux en lien avec les écosystèmes, la santé humaine et les ressources au sens large : il peut s'agir d'eau, de sols, de métaux ou de combustibles fossiles ou fissiles.

Nous nous accordons également sur l'augmentation attendue de la part que devrait jouer le vecteur électricité dans le bouquet énergétique. Néanmoins, cela ne doit pas éclipser les potentielles solutions non électriques.

▪ Page 3 : des oublis sur le bouquet énergétique futur pour le chauffage des logements

> De la même manière, est aujourd'hui recommandé le recours accru au chauffage électrique dans les logements[1], parallèlement aux stratégies de meilleure isolation des maisons, immeubles et appartements.
>
> *[1]Réseau de transport d'électricité, Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France. Rapport technique, 2019 : p. 98.*

Dans ce paragraphe, les auteurs citent le rapport (RTE, 2019)[4] pour dire qu'il est recommandé un recours accru au chauffage électrique en parallèle des efforts sur l'isolation des bâtiments.

En premier lieu, les auteurs auraient dû choisir des références plus récentes comme :

- ✓ la référence conjointe ADEME / RTE du 17 décembre 2020[5] dans laquelle les scénarios de décarbonation du chauffage suggèrent le transfert des systèmes actuels de chauffage utilisant des énergies fossiles vers des solutions bas carbone, dont l'électricité (en plus des réseaux de chaleur, du bois-énergie et du biométhane) ;
- ✓ et surtout la référence (RTE, 2021)[6] où, page 13, il est conclu que ce recours accru au chauffage électrique, quel que soit le scénario ou trajectoire évalué, « *la consommation d'électricité dans le secteur du bâtiment pour le chauffage doit rester proche de son niveau actuel (environ 60 TWh en données corrigées)* », ce qui corrobore le commentaire suivant.

Enfin, concernant le chauffage des bâtiments, une voie exclue dans ce rapport, mais aussi non discutée par RTE –sûrement parce qu'en dehors de son périmètre électrique– est celle du solaire thermique, qu'il soit passif par des mises en œuvre architecturales ou encore actif avec les chauffe-eaux solaires, les systèmes

[4] RTE, 2019. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France, rapport technique.
[5] https://presse.ademe.fr/2020/12/evaluation-de-scenarios-possibles-pour-decarboner-le-chauffage-dans-le-secteur-du-batiment-a-lhorizon-2035.html (lien accédé le 17 avril 2021).
[6] Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France - principaux enseignements, 24 pages. (https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-04/Bilan%20previsionnel%202021%20-%20principaux%20enseignements.pdf, lien accédé le 17 avril 2021).

solaires combinés, les systèmes de production d'eau chaude collective et les systèmes solaires sur réseaux de chaleur et en industrie[7]. Comme l'indique (EurObserv'ER, 2020)[8], la filière du solaire thermique répond à tous les critères pour prendre part à la transition énergétique pour le chauffage : « *parmi les différentes filières de production de chaleur, le solaire thermique est certainement la forme ultime du point de vue physique pour transférer de la chaleur à de l'eau sans aucune émission de gaz à effet de serre et sans émettre de polluant* (page 15) ».

- Pages 6-7 : le bilan carbone du photovoltaïque en question

> À ces problèmes d'acceptabilité sociale, non résolus pour l'instant, s'ajoute un bilan carbone ambivalent, pour le solaire en particulier.
> […]
> Seuls des processus de production de ces cellules à base d'électricité décarbonée (donc essentiellement nucléaire) pourraient conduire à un bilan carbone favorable à l'usage de ces cellules.

Pages 6-7, le document évoque « *un bilan carbone ambivalent, pour le solaire en particulier* ». Le paragraphe suivant précise que le raffinage de silicium est très énergivore, et que cette énergie provient essentiellement de centrale à charbon et n'est donc pas décarbonée. Tout cela est vrai, mais c'est le cas pour l'ensemble des filières énergétiques. Par exemple, la production d'une cuve de centrale nucléaire n'est pas davantage décarbonée, de même que la production de béton armé pour la réalisation d'ouvrage hydroélectrique, d'acier pour les mâts d'éoliennes. Afin d'établir un bilan environnemental d'une filière énergétique, il est nécessaire de réaliser des Analyses de Cycle de Vie (ACV), qui permettent de quantifier de manière systémique les impacts environnementaux de l'extraction des matières premières à la fin de vie.

Il est ensuite évoqué que « *le gain environnemental résultant de la production électrique d'origine solaire est incapable de compenser les émissions entraînées par cette fabrication.* ». Il est possible et probable que 30 ou 50 ans auparavant, il aurait fallu probablement autant –voire plus– d'énergie pour fabriquer un système solaire photovoltaïque que ce qu'il aurait produit sur sa période de fonctionnement (idem pour les émissions). Mais ça, c'était au siècle passé. Aujourd'hui, on estime l'empreinte carbone d'un système photovoltaïque installé en France métropolitaine, intégrant la fabrication, l'acheminement, l'installation et in fine le démantèlement des modules photovoltaïques, des câbles, des onduleurs ou encore les supports à moins de 50 gCO_2eq/kWh, même si les cellules sont produites avec de l'électricité issue à 100% de centrales à charbon. Dans les configurations les plus favorables, si le bouquet électrique est davantage décarboné, que l'on utilise les procédés de production de cellules les plus efficients, et des panneaux dotés d'un haut rendement, on peut descendre en deçà de 20 gCO_2eq/kWh (Besseau, 2019)[9]. Il est important de noter que l'empreinte carbone de l'énergie photovoltaïque évolue tendanciellement à la baisse avec une amélioration continue du rendement des systèmes photovoltaïques et une amélioration du rendement des procédés nécessaires à leurs productions, notamment celles des cellules en silicium cristallin. Ainsi, même si les systèmes photovoltaïques sont produits à partir d'énergie carbonée, ils constituent néanmoins un moyen de production électrique à faible empreinte carbone**.** Il est évidemment préférable de produire ces systèmes à

[7] https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-chaleur/solaire-thermique (lien accédé le 17 avril 2021).
[8] EurObserv'ER, 2020. Baromètres solaire thermique et solaire thermodynamique, 22 pages (http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/etudes/Observ-ER-barometre-energie-solaire-thermique-et-thermodynamique-2020.pdf, lien accès le 17 avril 2021 avec création d'un compte gratuit).
[9] Besseau, R., 2019. Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation, Thèse de doctorat en énergétique et procédés de l'Université de PSL, préparée à MINES ParisTech, 206 pages (http://www.theses.fr/2019PSLEM068, lien accédé le 17 avril 2021).

partir d'énergie la moins carbonée possible, l'empreinte carbone s'en trouve alors réduite. On peut d'ailleurs saluer le projet de création d'une usine de productions de panneaux photovoltaïques à Hambach en Moselle[10]. À titre d'information, l'outil web viewer.webservice-energy.org/incer-acv/app permet d'évaluer différents impacts environnementaux par unité d'énergie générée sur la durée de vie (*e.g.* gCO_2eq/kWh) ou par unité de puissance crête installée (*e.g.* gCO_2eq/kWc) ainsi que leurs incertitudes. Cet outil a été développé dans le cadre du projet INCER-ACV[11]. L'estimation précise d'un temps de retour carbone nécessite de faire des hypothèses toujours discutables sur la nature de l'énergie substituée, mais l'énergie photovoltaïque fait incontestablement partie des modes de production présentant une faible empreinte carbone, au même titre, entre autres, que les énergies nucléaire, éolienne ou hydroélectrique. Du fait des progrès précédemment évoqués, le temps de retour énergétique, qui évolue lui aussi à la baisse, est désormais estimé à un ou deux ans suivant la localisation[12].

Comme indiqué en préambule de cette note, un point important quant aux discussions « *lucides* » sur la durabilité de notre système énergétique est que les problématiques environnementales ne se limitent pas aux seules émissions de GES, évalué généralement par le critère de performance exprimé en gCO_2eq/kWh.

Pour aller plus loin sur ces considérations, le livre d'un des auteurs de cette note (Besseau, 2021)[13] discute des différents facteurs expliquant la baisse de l'empreinte carbone de l'énergie photovoltaïque. D'autres filières de production et de stockage d'énergie ainsi que d'autres impacts environnementaux que les seules émissions de GES (impacts sur la santé humaine, sur les écosystèmes, la biodiversité et sur les ressources au sens large) sont aussi présentés, analysés et discutés.

Cet ouvrage s'adresse à tous ceux qui souhaitent aller au-delà de la binarité entre "énergies propres" et "énergies sales". Il repose sur l'ACV : un outil fondamental qui permet d'appréhender l'évaluation de l'empreinte environnementale de l'énergie sous un angle systémique et multicritère évitant autant que possible toute vision partielle et partiale. L'ACV permet ainsi d'apporter des résultats qualitatifs et quantitatifs, notamment quant à l'empreinte environnementale des énergies que certains qualifient de "vertes" quand d'autres dénoncent leur "face cachée". À l'image de l'illustration de la couverture, qui représente dans une mosaïque la diversité de solutions énergétiques qui font notre monde, non sans impacts, cet ouvrage vise à alimenter le débat quant à la transition énergétique sous l'angle des impacts environnementaux.

- Page 6 : la consommation de superficies en terres arables et boisées du photovoltaïque

> De même, les centrales photovoltaïques de grande puissance, telles que celles construites en Gironde, sont consommatrices de grandes superficies de terres arables ou boisées. Elles nécessitent le déploiement de réseaux électriques basse tension notamment, dont l'insertion dans les espaces naturels est pour le moins délicate (et dont les pertes en ligne sont relativement élevées).

[10] https://www.republicain-lorrain.fr/economie/2021/03/31/usine-de-panneaux-photovoltaiques-a-hambach-rec-solar-reporte-sa-decision-a-fin-juin (lien accédé le 29 avril 2021)
[11] Pérez-Lopez, P., R. Jolivet, I. Blanc, R. Besseau, M. Douzieh, B. Gschwind, S. Tannous, J. Schlesinger, R. Brière, A. Prieur-Vernat, J. Clavreul., 2020. INCER-ACV : Incertitudes dans les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des filières de production énergétique par ACV, 67 pages (https://www.ademe.fr/incer-acv, lien accédé le 17 avril 2021).
[12] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE), PSE Projects GmbH, 2020. Photovoltaics report, 50 pages (https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf, lien accédé le 17 avril 2021).
[13] Besseau, R., 2021. Quelle empreinte environnementale pour notre avenir énergétique ? L'ACV: une méthode d'évaluation systémique et multicritère, 166 pages (https://www.pressesdesmines.com/produit/quelle-empreinte-environnementale-pour-notre-avenir-energetique/, lien accédé le 17 avril 2021).

Les centrales photovoltaïques seraient, selon les auteurs de ce rapport, des consommatrices de grandes superficies de terres arables ou boisées. Il est vrai que certains projets photovoltaïques au sol soulèvent des questions quant à leurs impacts environnementaux/écologiques locaux (biodiversité, diminution de surfaces boisées, atteintes au patrimoine, au paysage, etc.) : pour prendre un exemple d'actualité, le projet en gestation Horizeo[14] avec un parc photovoltaïque de 1 GWc sur un domaine privé forestier de 1000 ha est emblématique à ce titre.

Cependant, le rapport omet hélas d'ajouter que le déploiement du photovoltaïque peut tout à fait atteindre les objectifs souhaités, tout en évitant ces écueils, par plusieurs moyens :

- ✓ le déploiement sur <u>des zones délaissées et artificialisées,</u> mais propices aux centrales photovoltaïques : le rapport (ADEME, 2019)[15] recense l'équivalent d'un gisement d'une puissance crête de 49 GWc sur ces zones, en territoire national. Ces 49 GWc sont à mettre en relation avec la PPE[16] planifiant l'équivalent de 20,6 à 25 GWc de puissance installée photovoltaïque au sol en 2028. Un très bel exemple d'une centrale photovoltaïque de grande puissance (145 MW) déployée sur une zone délaissée de 149 ha est celle sur l'ancienne base OTAN de l'aéroport de Montmédy-Marville dans la Meuse, portée conjointement par les sociétés *TSE* et *Enerparc AG*. Le rapport de la mission régionale d'autorité environnementale (MRAe) Grand-Est[17] souligne d'ailleurs la grande qualité de l'étude d'impact avec, en outre, la délégation de « la gestion des espaces enherbés à un élevage ovin en agriculture biologique » ;
- ✓ le déploiement <u>sur le toit de bâtiments ou sur des ombrières de parking</u> (potentiel de 4 GWc[8]). Une étude faite en 2016 estime le potentiel des toits pour le photovoltaïque à plus de 360 GWc[18]. Même si cette estimation est complexe (ombrages, orientations des toits, etc.) et le résultat sûrement assez approximatif, son ordre de grandeur est très largement supérieur à la puissance crête du photovoltaïque en toiture entre 14,5 et 19 GWc[16], telle que planifiée par la PPE pour 2028 ;
- ✓ <u>l'hybridation de l'agriculture et du photovoltaïque</u> : il s'agit d'un sujet complexe car certaines expérimentations notamment avec de serres photovoltaïques se sont révélées pas ou peu productrices sur le plan agricole, avec notamment des serres « alibis » pour du développement purement énergétique[19]. Cela étant dit, des innovations technologiques comme les modules bifaciaux ou encore les supports de modules orientables et actionnables permettent d'envisager de vrais modèles soutenables de développement agricole (culture, élevages ovin, bovin, etc.) avec, en outre, une production soutenable d'énergie photovoltaïque. Mouratoglou et Elfassi (2020) [20] mentionnent notamment « *les ombrières photovoltaïques dynamiques pour la viticulture, l'arboriculture ou encore le maraîchage. La structure est surélevée en fonction des besoins de la culture et de ses conditions d'exploitation comme le passage d'engins agricoles, et le mouvement des modules est piloté de manière à s'adapter en temps réel aux conditions météorologiques, afin d'optimiser le rendement agricole* ». Cette

[14] https://www.neoen.com/var/fichiers/20210111-cp-horizeo-vf.pdf (lien accédé le 17 avril 2021).
[15] ADEME, 2019. Evaluation du gisement relatif aux zones délaissées et artificialisées propices à l'implantation de centrales photovoltaïques, 75 pages (rapport), 9 pages (synthèse) (https://www.ademe.fr/evaluation-gisement-relatif-zones-delaissees-artificialisees-propices-a-limplantation-centrales-photovoltaiques, lien accédé le 17 avril 2021).
[16] *Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), Stratégie pour l'énergie et le climat, 400 pages.* (https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf, *lien accédé le 17 avril 2021)*
[17] http://www.mrae.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2018apge29.pdf, lien accédé le 17 avril 2021.
[18] ADEME, 2016. Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations (https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations, lien accédé le 17 avril 2021).
[19] https://www.pleinchamp.com/actualite/fruits-legumes~serres-photovoltaiques-entre-l-ombre-et-la-lumiere (lien accédé le 17 avril 2021).
[20] https://www.actu-environnement.com/blogs/diane-mouratoglou-paul-elfass202i/92/avis-expert-bctg-avocat-agrivoltaisme-135.html (lien accédé le 17 avril 2021).

hybridation photovoltaïque / agricole peut donc être, sous conditions, tout à fait bénéfique en soutenant et en redynamisant l'agriculture, en favorisant le développement économique locale de manière durable et soutenable et en permettant une meilleure acceptabilité sociale de la filière photovoltaïque (Pascaris *et al.*, 2021)[21] ;

- ✓ le déploiement du photovoltaïque flottant : cette voie est émergente au niveau mondial et a fait l'objet en 2019 d'un rapport de la Banque Mondiale au nom –partiellement– poétique « *Where the Sun meets Water : Floating solar market report* »[22]. Les aspects positifs annoncés sur les impacts environnementaux (limitation de l'évaporation et de l'eutrophisation des lacs) comme l'absence d'impacts négatifs sur la vie aquatique sont à vérifier, à évaluer et éprouver par des retours d'expérience et des études scientifiques. De même des retours d'expérience sur le long terme sont à analyser pour évaluer les impacts de l'environnement sur le matériel. Le premier projet de photovoltaïque flottant en France a vu le jour fin 2019[23] avec 17 ha de modules photovoltaïques flottants pour une puissance crête de 17 MWc. À notre connaissance, il n'existe pas encore d'évaluation du gisement de lacs ou de retenues d'eau artificiels en France favorable au développement du photovoltaïque flottant.

▪ Page 8 : l'artificialisation des sols

Pour obtenir une augmentation massive de la production d'électricité renouvelable, une des principales difficultés résiderait dans l'artificialisation de grandes surfaces foncières par des unités de production photovoltaïques et l'altération des paysages par des éoliennes à terre ou en mer. La réponse à ce défi est-elle facile ? Probablement non.

Ce paragraphe reprend la même critique que celle de la page 6 commentée et discutée précédemment. Cependant, un terme intéressant est employé : celui de l'artificialisation. Même si un consensus sur l'artificialisation des centrales photovoltaïques au sol n'est pas encore à l'ordre du jour, la réponse de l'exécutif à une question écrite par la sénatrice Mme Lopez (Gard) sur la comptabilisation des surfaces photovoltaïques au titre de la consommation de foncier[24] est la suivante : « *Ainsi, peuvent n'être comptabilisées comme consommatrices d'espaces que les centrales photovoltaïques n'ayant pas permis le maintien d'une part significative d'agriculture ou n'ayant pas permis le maintien d'une part significative de biodiversité* ».

Cette question sur les impacts des énergies dans ses composantes de production, de transport, de stockage et d'usages et qu'elles soient d'origine renouvelable, fossile ou nucléaire sur la biodiversité, les sols et les paysages est un champ extrêmement vaste et complexe –au sens étymologique de fait d'éléments différents, imbriqués– d'investigation scientifique qu'il convient évidemment d'intensifier. Le rapport de l'ADEME *et al.* (2020)[25] propose un intéressant état des lieux des impacts des énergies renouvelables montrant cette complexité et le travail encore très important à poursuivre notamment sur la « *transposition opérationnelle [des études d'impacts] au niveau français ou européen* ». Plus particulièrement, concernant les impacts sur

[21] Pascaris, A.S., C. Schelly, L. Burnham, J.M. Pearce, 2021. Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. Energy Research & Social Science, 75, 102023, doi:10.1016/j.erss.2021.102023.
[22] World Bank Group; Energy Sector Management Assistance Program; Solar Energy Research Institute of Singapore. 2019. Where Sun Meets Water : Floating Solar Market Report. World Bank, Washington, DC. © World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31880. License: CC BY 3.0 IGO.
[23] https://energie-partagee.org/projets/o-mega-1/ (lien accédé le 17 avril 2021).
[24] http://www.senat.fr/basile/visio.do?id=qSEQ181208002 (lien accédé le 17 avril 2021).
[25] ADEME, Deloitte développement durable, Biotope, 2020. Etat de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts, https://www.ademe.fr/etat-lart-impacts-energies-renouvelables-biodiversite-sols-paysages-moyens-devaluation-impacts (lien accédé le 20 avril 2021).

la biodiversité des centrales photovoltaïques au sol, Peschel *et al.* (2019)[26] apportent des éléments factuels basés sur l'analyse de 75 d'entre elles en Allemagne. Les auteurs concluent que les centrales photovoltaïques peuvent être considérées comme positives non seulement sur le plan de la lutte contre le changement climatique, mais aussi sur la préservation de la biodiversité à condition que leurs conceptions (les espaces inter-rang, la densité des modules, l'emprise totale intégrant les raccordements et la voirie, etc.), leurs constructions (évitement du tassement du sol, minimisations des fondations, etc.) et leurs gestions (recours au pâturage, hybridation avec l'agriculture, etc.) suivent un certain nombre de recommandations et de standards déjà identifiés.

Nous soulignons enfin que la structure porteuse des modules photovoltaïques d'une centrale solaire au sol peut être supportée par des pieux vissés au sol, sans fondation en béton. Dans ces conditions, le démantèlement de la centrale à l'issue (« retour à l'herbe ») de sa fin de vie est-il singulièrement simplifié sur les plans techniques et financiers. Cette caractéristique de « réversibilité » de cette infrastructure énergétique est sûrement à intégrer dans les discussions et les comparaisons à propos de cette notion d'artificialisation et des moyens techniques et des couts de démantèlement des autres infrastructures énergétiques.

- Page 10 : l'intégration du PV en courant continu

> L'intégration de l'électricité produite sur l'ensemble du territoire à partir d'éolien et de solaire au réseau de transport et de distribution pose de très importants problèmes techniques. Par exemple, la production photovoltaïque se fait en courant continu basse tension, alors que le réseau transporte un courant alternatif haute tension pour limiter les pertes. La dispersion des sources de production sur l'ensemble du territoire rend la résolution de cette question encore plus ardue.

Dans ce paragraphe, les auteurs prétendent que la production en courant continu (DC, *direct current*) basse tension des modules photovoltaïques pose de « très importants problèmes techniques » pour l'intégration dans le réseau électrique.

Cette partie est étonnante car les systèmes de production photovoltaïque, qu'ils soient de petite taille (système individuel sur un toit de quelques kWc) ou de grande taille (parc photovoltaïque de plus de 100 MWc), sont tous composés de modules photovoltaïques et d'onduleurs. Ces onduleurs permettent la transformation du courant continu (DC) produit par un ensemble de modules photovoltaïques en courant alternatif (AC, *alternating current*). Ces onduleurs fonctionnent avec une efficacité de plus de 95 %, avec une moyenne de l'ordre de 98 %, voire plus[27].

En plus de ne pas poser de problèmes techniques particuliers, les onduleurs actuels permettent d'offrir en outre des services au réseau électrique dans lequel son énergie est injectée sous forme de courant alternatif. Dans un article publié en 2020, dans *Solar Energy*[28], les auteurs listent l'ensemble des services que peuvent désormais rendre les onduleurs au réseau électrique, comme la capacité d'écrêtage actif de puissance (sur

[26] Peschel, R., T. Perschel, M. Marchand, J. Hauke, 2019. Solar parks – profits for biodiversity. BNE, association of Energy Market Innovators (bne/Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.), 109 pages (https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/Englisch/Publications/201911_bne_study_biodiversity_profits_from_pv.pdf, lien accédé le 20 avril 2021).
[27] https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/fonctionnement-et-categories-des-onduleurs-photovoltaiques/rendement-et-performance-des-onduleurs/ (lien accédé le 29 avril 2021).
[28] Peng, Q., A. A. Sangwongwanich, Y. Yang, F. Blaabjerg, 2020. Grid-friendly power control for smart photovoltaic systems, Solar Energy, 210, pp. 115-127, doi:10.1016/j.solener.2020.05.001.

commande), ou celle de réduire la part de la puissance active produite pour générer de la puissance réactive à la demande du réseau pour des besoins de régulation de tension.

Cette capacité d'écrêtage actif de la production photovoltaïque rend les systèmes photovoltaïques partiellement pilotables. Avec la baisse tendancielle des couts des modules photovoltaïques (et des onduleurs), cette capacité d'écrêtage actif de puissance permet d'envisager un certain niveau de surdimensionnement des infrastructures photovoltaïques et d'être capable de réduire de manière proactive la puissance produite en fonction de la demande et du reste des capacités de production et de stockage en fonction de considération économique et technique du moment. Ce mécanisme de pilotage permet de réduire considérablement le besoin en stockage d'énergie ou le recours à des systèmes de production rapide, à gaz, par exemple. Ce principe est décrit de manière vulgarisée dans un article publié dans *The Conversation* en 2019[29] ou de manière plus scientifique notamment dans le papier publié dans *Solar Energy,* aussi en 2019[30].

- Pages 10-11 : le danger d'un repli social lié au développement de l'autoconsommation locale

On peut imaginer de favoriser l'usage local d'une production locale, et cela est hautement souhaitable, mais il sera difficile dès lors d'éluder la question fondamentale de la solidarité nécessaire entre les consommateurs. Si les moyens individuels de production et de stockage venaient à se généraliser, comment garantir à l'avenir que chacun consente à contribuer au financement collectif des réseaux ?

La notion de solidarité entre les consommateurs est en effet capitale pour la cohésion sociale de notre pays. Il faut donc effectivement veiller à ce que la consommation locale d'une production locale ne devienne pas un repli sur soi et ne nuise pas à ce bien commun qu'est le système énergétique électrique que l'on a la chance d'avoir en France.

La loi n° 2017-227 du 24 février 2017[31] (décret d'application en avril 2017) a mise en place des mesures en faveur de l'autoconsommation en distinguant les autoconsommations individuelles et collectives. Dans les deux cas, le compteur communicant (Linky) est central. L'autoconsommation collective, limitée à un rayon de 1 km, peut être étendue sur un rayon de 10 km, repose sur le principe d'une autoconsommation virtuelle de répartition de la production entre un ou plusieurs consommateurs proches.

Cette autoconsommation collective est intéressante pour au moins trois raisons :

- ✓ selon le rapport édité en 2020 par le labo de l'économie sociale et solidaire[32], « *l'autoconsommation est surtout un vecteur pour mettre en œuvre concrètement et localement la transition énergétique au plus près des citoyens. Si les conditions de son développement sont assurées, l'autoconsommation est de nature à avoir un effet culturel fort en renforçant l'implication des citoyens dans la transition énergétique* » ;

[29] Perez, R., B. Tournadre, 2019. Pour une énergie 100 % renouvelable compétitive, il faut stocker et… surproduire (https://theconversation.com/pour-une-energie-100-renouvelable-competitive-il-faut-stocker-et-surproduire-127559, lien accédé le 17 avril 2021).
[30] Perez, M., R. Perez, K. R. Rabago, M. Putnam, 2019. Overbuilding & curtailment: The cost-effective enablers of firm PV generation, Solar Energy, 180, pp. 412-422, doi: 10.1016/j.solener.2018.12.074.
[31] https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000034080223/ (lien accédé le 17 avril 2021).
[32] Le labo de l'économie sociale et solidaire, 2020. L'autoconsommation : effet de mode ou vecteur de la transition énergétique citoyenne ?, 64 pages (https://energie-partagee.org/wp-content/uploads/2020/09/2020.09.21-Publication-TEC-AutoConso.pdf, lien accédé le 17 avril 2021).

- ✓ le cout actualisé d'une production photovoltaïque locale par exemple d'un bâtiment communal est relativement faible (actuellement, typiquement moins de 9 c€/kWh, hors taxes et TURPE) et n'est pas soumis aux aléas tendanciellement à la hausse de prix de l'électricité (+ 50% sur les 10 dernières années) : l'autoconsommation collective peut donc constituer un projet permettant à un ensemble de citoyens de profiter d'une source supplémentaire d'énergie à cout faible et stable dans le temps : en ce sens, elle peut contribuer à la solidarité locale pour la lutte contre la précarité énergétique ou la compétitivité des entreprises sur les territoires en « circuits courts » énergétiques ;
- ✓ l'autoconsommation collective est soumise à la TVA, la CSPE (Contribution au service public de l'électricité), à la TCFE (Taxes sur la Consommation Finale d'Électricité) et au TURPE (Tarif d'utilisation du réseau public d'électricité) : elle contribue donc au financement de notre réseau de distribution.

Au-delà des commentaires précédents portant sur le cœur de notre expertise professionnelle, nous souhaitons en outre relever deux points supplémentaires :

▪ Pages 3-4 : des scénarios de sortie du nucléaire en « contradiction » avec l'électrification ?

Le rapport évoque, pages 3-4, deux éléments qui apparaissent effectivement en parfaite contradiction. Dans un premier temps, le rapport évoque des scénarios envisageant une hausse de la consommation électrique notamment du fait de l'électrification de certains usages : il s'agirait d'une « *augmentation de quelque 40-45 % », « voire davantage selon certaines projections* ». Dans un second temps, le rapport évoque une deuxième série de scénarios conduisant à une baisse de la production d'électricité nucléaire avant de conclure à un « gouffre » entre l'évolution annoncée de la consommation et celle de la production par le « rapprochement de ces deux orientations ».

Or, bien que les scénarios en question ne soient pas ici cités, on peut noter que l'intégralité des scénarios étayés de sortie du nucléaire et des énergies fossiles (ADEME 100% EnR[33], scénario négaWatt[34], scénario Watt de RTE[35] qui ne comporte plus que 11% de nucléaire à l'horizon 2035) ont pour point commun une maîtrise ambitieuse de la consommation énergétique, qui se traduit notamment par une baisse du volume d'électricité produite malgré une électrification, plus ou moins poussée, d'autres usages énergétiques (transport, chauffage).

L'idée ici n'est pas de discuter du réalisme, de la faisabilité ou même de la désirabilité de ces scénarios, mais de pointer, qu'à notre connaissance et à l'heure actuelle, l'ensemble des scénarios de sortie du nucléaire en France métropolitaine correspondent à des scénarios de maîtrise forte de la consommation énergétique. Dans ces scénarios, la part du vecteur électricité augmente, mais pas son volume du fait des importants efforts de maîtrise de la consommation. Il n'y a donc pas de contradiction à proprement parler puisqu'il ne s'agit pas des mêmes scénarios, et donc des mêmes évolutions sociétales. S'interroger sur notre capacité collective en tant que société à atteindre ces objectifs devrait aussi être, à notre sens, un préalable à toute édification de scénarios de transition énergétique, en général.

Dans la seconde partie du document, à la page 20, il est reproché à ces scénarios, de ne pas toujours expliciter les hypothèses sur lesquelles ils reposent. Par ailleurs, il est reproché au scénario de 100% EnR de l'ADEME

[33] ADEME, 2016. Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations (https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations, lien accédé le 17 avril 2021).
[34] Scénario négaWatt, 2017-2050, dossier de synthèse, 48 pages (https://negawatt.org/IMG/pdf/synthese_scenario-negawatt_2017-2050.pdf, accédé le 17 avril 2021).
[35] Réseau de transport d'électricité (RTE), 2017. Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France, édition 2017, synthèse, 44 pages (https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bp2017_synthese_17.pdf, lien accédé le 17 avril 2021).

de considérer que la majorité des usages seront très majoritairement pilotables. Or, cela est indiqué en toute transparence dans l'étude qui dès les premières pages précise que le scénario est « *techniquement possible, ceci sans en sous-estimer les conditions nécessaires, qu'il s'agisse des aspects techniques, économiques (dont notamment le coût supportable par la collectivité) ou encore l'acceptabilité sociale* » ou bien qu'il « *suppose des efforts conséquents quant à la maîtrise de la demande à cet horizon (avec une consommation d'électricité annuelle de 422 TWh). Sur les 422 TWh de consommation électrique annuelle en France, des ratios de demande flexible ont été déterminés pour différents usages, aboutissant à un gisement de 60 TWh d'électricité pilotable (suivant des modalités différentes en fonction des usages)* ». Ces aspects ne sont donc pas éludés, bien qu'il soit possible que certaines personnes, reprenant cette étude, ne les reprécisent pas.

Enfin, de nouveaux scénarios sont attendus dans le cadre du Bilan prévisionnel long terme « Futurs énergétiques 2050 »[36] mené par RTE, et fait justement l'objet d'une consultation publique sur le cadrage et les hypothèses qui seront considérées dans ces scénarios.

- **Page 5 : la réinterprétation partielle et partiale de l'étude conjointe de RTE et de l'IEA**

Le rapport s'engage, page 5, dans une reformulation incomplète que l'on peut qualifier pour le moins de biaisée du rapport de synthèse publié conjointement par RTE et l'AIE[37] dont on peut trouver les conclusions sont résumées en quatre points clés ici. Le rapport reformule en effet maladroitement ces quatre conditions techniques nécessaires à la réalisation d'un bouquet électrique de type « 100% EnR » et précise que sur ces quatre conditions, seule la troisième « *apparaît techniquement réalisable* » ou bien que « *tous les spécialistes analysent donc la réalisation de ces quatre conditions comme hautement improbable* ». Or, le rapport (IEA et RTE, 2021) indique précisément qu'il « *existe un consensus scientifique sur l'existence de solutions technologiques permettant de maintenir la stabilité du système électrique sans production conventionnelle* », même si elles doivent faire l'objet d'une démonstration à grande échelle.

[36] RTE, 2021. Bilan prévisionnel long terme « Futurs énergétiques 2050 », Consultation publique sur le cadrage et les hypothèses des scénarios, 96 pages (https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/Bilan%20Previsionnel%202050-consultation-complet.pdf, lien accédé le 29 avril 2021).
[37] International Energy Agency (IEA), RTE, 2021. Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050, 24 pages (https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese%20ENR%20horizon%202050_FR.pdf, lien accédé le 17 avril 2021).