

# Mettre l'innovation sur la trajectoire du facteur 4 : la mobilité solaire en 2030

Nathalie Taverdet-Popiolek, Daniel Quénard,  
Françoise Thais, Simon Vinot, Olivier Wiss

*La mobilité solaire, qui allie la technologie photovoltaïque et le véhicule électrique, attire l'attention des politiques dans la mesure où elle peut contribuer à la fois à diminuer le bilan CO<sub>2</sub> des secteurs transport et résidentiel et à dynamiser l'économie nationale. Ces objectifs ne devraient être atteints que si certaines conditions sont vérifiées : couplage intelligent du véhicule électrique avec le réseau, localisation sur le territoire d'une grande partie de la chaîne de valeur des industries associées, intégration des nouveaux usages de mobilité, acceptabilité par le public... Pour apporter un éclairage partiel, mais néanmoins instructif, sur ces questions difficiles, l'angle d'approche est celui de l'étude de cas projetés en 2030 où la mobilité solaire est intégrée à une maison individuelle dont on a simulé les consommations électriques des habitants (équipements, mobilité) avec une réponse apportée soit par le photovoltaïque installé sur le toit, soit par le réseau. La voiture électrique peut restituer son énergie pour satisfaire une partie de la demande des équipements de la maison (notion de Vehicle to Home : V2H). Les simulations montrent que, dans un cadre d'hypothèses assez conservatrices par rapport aux données actuelles caractérisant les technologies étudiées et leur contexte, la mobilité solaire est intéressante relativement à une mobilité essence hybridée performante, et cela du double point de vue, économique et environnemental (bilan CO<sub>2</sub> et coût différentiels). Ce double avantage devrait être renforcé avec des hypothèses intégrant davantage les progrès technologiques attendus à l'horizon 2030.*

Dans son rapport *Énergie 2020, Stratégie pour une énergie compétitive, durable et sûre* paru en 2010<sup>1</sup>, la Commission européenne a défini cinq axes prioritaires pour la stratégie à mener par les membres de l'Union en matière de politique énergétique, parmi lesquels on trouve l'efficacité énergétique (bâtiment basse consommation, production d'électricité en local, gestion intelligente...) et le développement des technologies et innovations liées à l'énergie.

1. Commission Européenne, 2010.

En France, les lois Grenelle I (2009) rappellent les objectifs de division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 par rapport à 1990 (facteur 4)<sup>2</sup>. Elles visent une proportion de 23% d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie totale d'ici 2020 et la mise en place du Plan Bâtiment stipulant notamment qu'à cet horizon tous les nouveaux bâtiments devront être à

2. Objectifs fixés par la loi Pope en juillet 2005.

«énergie positive» (BEPOS)<sup>3</sup>. Le Grenelle II (2010) conforte ces objectifs et inscrit dans ses textes le déploiement des véhicules électriques et hybrides rechargeables. Il table sur la commercialisation de 2 millions de véhicules de ces types en 2020 (ce qui représenterait 30% des ventes de véhicules en 2020)<sup>4</sup>.

Plan Bâtiment et développement de la mobilité électrique sont des mesures phares du Grenelle, ce qui se justifie dans la mesure où le bâtiment et les transports sont, en France, les plus gros consommateurs d'énergie<sup>5</sup> et, de fait, les principaux émetteurs de gaz à effet de serre, le poids de l'industrie allant decrescendo dans ce domaine depuis 1990. En outre, les voitures particulières sont responsables de plus de la moitié des émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des transports (DGEC 2013).

Au regard de ces enjeux et de l'objectif de promouvoir les énergies renouvelables, le développement de la mobilité solaire pour les particuliers prend toute son importance : les nouveaux bâtiments à énergie positive seront des sites de production d'énergie grâce au photovoltaïque par exemple et deviendront aussi le lieu de recharge des véhicules hybrides rechargeables et des véhicules électriques. Puisque, dans le modèle d'usage actuel, les véhicules sont en moyenne 95% du temps à l'arrêt et que le temps de recharge est long<sup>6</sup>,

il semble judicieux de vouloir profiter de ces longues périodes de stationnement, soit auprès de bâtiments producteurs d'énergie (dans le garage d'une maison ou sur le parking d'un bureau à énergie positive), soit sur des parkings relais sur lesquels seront installés des panneaux photovoltaïques (Quénard, 2006, 2008). Cette convergence bâtiment-transport pourrait même être accentuée si les batteries des véhicules sont utilisées comme moyen de stockage d'énergie et permettent de répondre aux fluctuations de production et de consommation. Cependant, réussir à instaurer un système vertueux qui conduise à un couplage optimal entre la production photovoltaïque et l'usage du véhicule électrique suppose un changement de nos rapports au bâtiment, au transport et à l'énergie. Cela repose aussi fortement sur des progrès technologiques, sur l'apparition d'une offre industrielle performante et sur des actions publiques appropriées. L'État, par le biais de sa politique d'innovation, dispose de nombreux outils pour orienter et stimuler les transformations en cours. Comme le résume la Figure 1, les actions à mettre en œuvre pour promouvoir la mobilité solaire s'inscrivent dans un système complexe et plus large, intégrant les objectifs des politiques énergétique, climatique et industrielle dans le respect des contraintes budgétaires et de la cohésion sociale et territoriale. C'est à ce prix seulement que la mutation technologique et sociétale pourra se faire dans de bonnes conditions et il sera intéressant d'identifier la politique d'innovation la mieux adaptée.

Pour ce faire, il convient d'évaluer au préalable la viabilité de ce couplage innovant pour une famille individuelle. Le dispositif est-il rentable pour cette famille et permet-il, à cette échelle, de réduire les émissions de gaz à effet de serre?

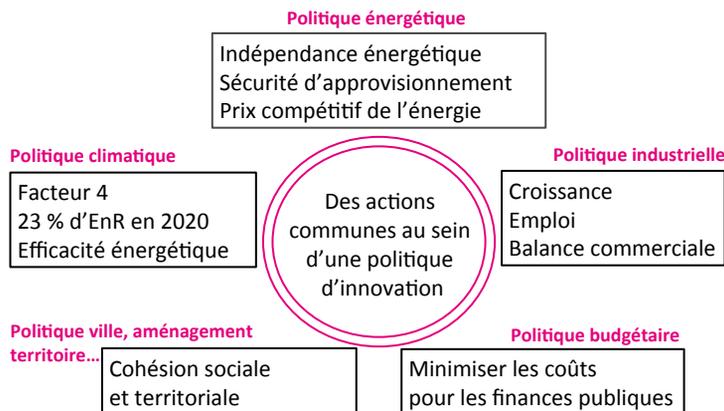
L'objet de cet article est d'apporter des éléments de réponse en élaborant le *business model* de la mobilité solaire (véhicule 100 % électrique rechargé par du photovoltaïque) pour une famille française particulière vivant dans une maison individuelle en zone périurbaine en 2030. Cet horizon de moyen terme sur le chemin de 2050 a été retenu car il est un bon compromis entre l'inertie des systèmes étudiés et la possibilité malgré tout d'envisager

3. Ces deux objectifs font partie de la déclinaison nationale du Paquet énergie climat européen (3 \* 20 %).

4. Le 13 avril 2010, à la suite du Grenelle de l'environnement, une charte a été signée entre le gouvernement, 12 collectivités territoriales et les deux constructeurs automobiles PSA et Renault pour préparer la pré-commercialisation du véhicule électrique sur le marché français (financement, standards pour les infrastructures de recharge, commandes publiques...) (ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, 2010).

5. Avec une consommation de 69 millions de tonnes équivalent pétrole (44% de l'énergie finale totale en 2011, DGEC 2012), le secteur résidentiel-tertiaire en France (DOM inclus) émet 92,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub><sup>équivalent</sup> (17,7% des émissions nationales, DGEC 2013). La part des transports routiers dans les émissions nationales est de 24% (125 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, DGEC 2013) pour une consommation de 50 millions de tonnes équivalent pétrole (32% de l'énergie finale totale, DGEC 2012).

6. Pour un plein, il faut compter entre 1h30 pour la PRIUS hybride rechargeable de Toyota et 6h pour la plupart des voitures tout électrique (sources site, AVEM).



**Figure 1. Les enjeux de la politique française d'innovation dans le domaine énergétique.**

des ruptures technologiques, organisationnelles et sociétales.

Comme on le verra, avec une projection en 2030 des paramètres affectant la viabilité économique et environnementale de l'innovation, on constate que la mobilité solaire est intéressante de ce double point de vue. La question est alors de savoir si la généralisation à grande échelle de ce concept préservera cet avantage. Sans y répondre, nous soulevons les problèmes que cette diffusion à l'échelle nationale pourrait poser et donnons les toutes premières pistes pour une politique publique cohérente. La suite du projet POLINOTEN s'attachera à les approfondir.

### **1. Analyse de la viabilité du « véhicule électrique couplé au solaire photovoltaïque intégré au bâtiment » pour une famille française**

Nous allons analyser les bilans environnementaux et économiques associés au mode de vie d'une famille française, Mr, Mme Dupond et leur enfant, vivant dans une maison individuelle en zone périurbaine. Mme Dupond se rend au travail en journée avec un véhicule électrique rechargé prioritairement par de l'électricité photovoltaïque et, à défaut, par le réseau. La zone périurbaine a été choisie car elle offre de la surface pour l'installation des panneaux photovoltaïques, étant entendu qu'il faut veiller à ne pas empiéter sur la surface agricole utile en

utilisant le toit des maisons et les parkings déjà artificialisés.

La maison considérée en 2030 est celle qui sera la norme à cette échéance, *i.e.* une maison à énergie positive (BEPOS). Cependant, pour l'analyse, nous n'exploitons pas tous les avantages de cette norme puisque les consommations énergétiques réglementaires liées au chauffage, à la climatisation et à l'eau chaude sanitaire sont considérées comme forfaitaires. Nous ne prenons en compte que la consommation des équipements électriques de la maison : usages spécifiques comprenant électroménagers (hors cuisson), multimédia, éclairage et véhicule électrique s'il peut y être rechargé. Cette hypothèse se justifie dans la mesure où le poste lié aux usages spécifiques deviendra dans le futur relativement important par rapport au chauffage, et ce d'autant plus que le véhicule électrique prendra sa place dans le foyer.

Les habitudes de consommation électrique sont fixées pour les équipements de la maison (électroménager, multimédia et éclairage). À défaut d'avoir fait une projection en 2030, nous nous sommes basés sur les profils de consommation issus des travaux de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour la période 2003 et 2005 (Knight *et al.*, 2007). Ils se rapportent à un nombre de 3 personnes<sup>7</sup> vivant dans 65 m<sup>2</sup>. Selon les relevés effectués avec un

7. En 2010, les ménages français sont composés en moyenne de 2,36 personnes (CGDD, 2011), ce qui est proche de la moyenne anglaise.

### À propos de cet article

Cet article est le reflet d'une partie d'un travail effectué dans le cadre du projet POLINOTEN<sup>1</sup> cofinancé par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité des politiques de développement des nouvelles technologies de l'énergie en s'attachant tout particulièrement au concept de la voiture électrique couplée au solaire photovoltaïque intégré au bâtiment, à l'horizon 2030. Le projet se situe dans le programme « Mettre l'innovation sur la trajectoire du facteur 4 » de l'ADEME et contient comme partenaires : l'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé) et l'Institut national de l'énergie solaire (INES) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), IFP Energies nouvelles (IFPEN) et l'Institut de management de la recherche et de l'innovation (IMRI) de l'université Paris-Dauphine. Les simulations présentées sont relatives aux aspects environnementaux et économiques de la mobilité solaire en 2030. Elles s'appuient sur deux autres parties du projet non détaillées ici : l'une simulant les usages électriques du bâtiment comprenant la mobilité ; l'autre analysant les politiques d'innovation dans le champ énergétique. Le projet qui se poursuit vise maintenant à réfléchir aux politiques à mettre en place pour favoriser, à cet horizon, la diffusion à grande échelle de la mobilité solaire sur le territoire français.

1. Politique d'innovation en faveur des technologies énergétiques.

pas de temps de 5 minutes, la consommation électrique de la famille avoisine 3028 kWh/an.

Sur le lieu de travail, la consommation électrique n'est pas prise en compte car il n'existe aucune base de données pertinente, relative aux usages et à la consommation électrique dans le tertiaire. Cette hypothèse, qui peut paraître forte, devient réaliste dès lors que l'on considère l'alternative du parking relais, déconnecté du lieu de travail, comme endroit de recharge du véhicule.

Le profil de consommation de la famille Dupond étant ainsi donné, nous accordons dans cette étude une importance toute particulière aux modalités de recharge du véhicule : photovoltaïque ou réseau, moments de charge, utilisation de la batterie du véhicule électrique comme appoint à domicile.

#### A) Modalités de charge du véhicule

Ces modalités, qui affectent significativement les bilans environnemental et économique, sont analysées en envisageant différents cas de figure, selon que l'équipement « photovoltaïque et prise de recharge pour le véhicule » est disponible à domicile uniquement, au travail uniquement ou bien dans les deux lieux simultanément.

Comme mentionné, le dimensionnement du photovoltaïque à domicile est prévu de manière à ce que la maison soit à énergie positive sur l'année : pour les équipements et la mobilité dans les cas où la charge à domicile est possible et uniquement pour les équipements dans le cas contraire. Quant aux panneaux photovoltaïques destinés à la recharge de la batterie sur le lieu de travail, ils couvrent 13 m<sup>2</sup> du toit au dessus de la place de parking pour tous les cas où cette recharge est possible. Un appoint réseau est envisageable au travail pour le véhicule uniquement quand celui-ci ne peut être rechargé à domicile. La Figure 2 résume les différents cas étudiés.

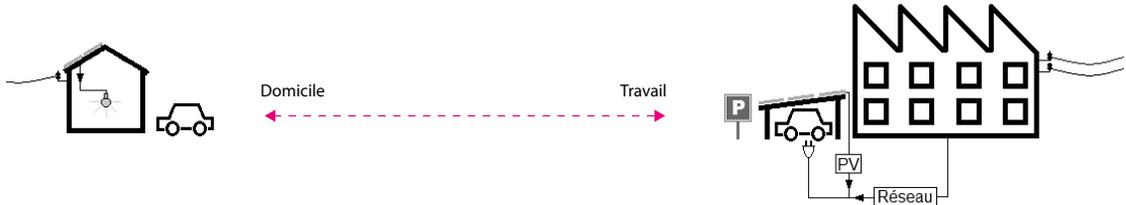
Quelle que soit la configuration (domicile, travail ou les deux), on impose des règles pour éviter que le dispositif associé à la mobilité électrique ne sollicite trop le réseau. En effet, s'il y avait dissémination à l'échelle de la France de ce type de véhicule, il faudrait éviter de renforcer les pics de consommation (appel de puissance notamment le soir) et gérer judicieusement le moment de charge<sup>8</sup>. Un système

8. Dans un scénario du pire, de Boncourt (2011) cite le cas d'une recharge rapide de 3,5 millions de véhicules en heure de pointe. Ceci augmenterait la consommation de 4 GW et créerait un second pic à la mi-journée.

### 1) Recharge à domicile uniquement



### 2) Recharge au travail



### 3) Recharge à domicile et au travail



**Figure 2. Configuration des différents cas de mobilité solaire retenus.**

d'incitation financière, le recours aux *smart grids*, sont autant de moyens à mettre en œuvre pour éviter que le véhicule électrique ne pèse trop lourd dans la gestion du réseau. Celui-ci pourrait même aider à améliorer cette gestion si sa batterie était utilisée pour alimenter les équipements de la maison aux heures de pointe et participer ainsi à la stratégie d'effacement du gestionnaire de réseau. C'est le concept du *Vehicle to Grid* (V2G) qui nécessite la mise en place d'un système intelligent et complexe avec trois composantes : l'habitat, le transport et le réseau. La normalisation prend à cet égard toute son importance (cf. l'encadré « Problématique de la normalisation »).

#### **B) Règles d'usage supposées pour la mobilité solaire**

En 2030, la parité réseau<sup>9</sup> étant supposée atteinte, on privilégie l'autoconsommation en

attribuant la production photovoltaïque en priorité aux équipements de la maison, puis à la recharge de la batterie du véhicule (s'il existe une borne) et enfin à la réinjection sur le réseau électrique. À noter qu'actuellement, avec la politique de tarif d'achat de l'électricité solaire, aucune priorité n'est mise en œuvre, mais il est économiquement plus intéressant pour le particulier de vendre le kWh photovoltaïque produit.

À la maison comme au travail, le véhicule électrique est rechargé en priorité par le système photovoltaïque. La recharge par le réseau électrique ne se fait que si l'état de charge de la batterie est insuffisant pour effectuer 1 fois 1/2 le trajet quotidien et en respectant des plages horaires strictes : à domicile entre 22h et 8h et sur le lieu de travail entre 10h et 12h ou entre 14h et 17h30. Ce sont des plages horaires qui évitent les heures de pointe<sup>10</sup>. Entre 18h et 22h,

9. Produire de l'électricité photovoltaïque coûte de moins en moins cher, en raison notamment de la baisse des coûts de fabrication des panneaux. Lorsque le coût de production photovoltaïque sera égal au prix de vente de l'élec-

tricité conventionnelle, qui ne cesse d'augmenter, on aura atteint la parité réseau.

10. Peut-être aurait-il fallu éviter aussi la plage horaire 7h-8h le matin, période de consommation relativement forte.

**Problématique de la normalisation**

En l'état actuel, la norme NF EN 61851-1 (avril 2012), décrivant les règles générales pour les systèmes de charge conductive pour véhicules électriques, intègre des fonctions très évoluées telles que la gestion d'un flux d'énergie bidirectionnel ou l'ajustement de la puissance de charge en temps réel. Il n'est cependant pas fait référence à l'information du système de charge par le véhicule en ce qui concerne son besoin en énergie (état de charge). Ce point est éminemment regrettable car cette information est critique pour assurer une bonne gestion énergétique. Effectivement, la connaissance de l'état de charge permettrait de planifier de manière optimale la recharge du véhicule électrique en fonction de la ressource disponible, voire de prioriser la recharge des véhicules les moins chargés. Il est à souhaiter que cette fonction soit rendue obligatoire dans les prochaines versions de la norme. Cette contrainte peut éventuellement être contournée par une saisie manuelle sous la responsabilité de l'utilisateur via une Interface homme-machine (IHM) présente sur le système de recharge ou via un objet mobile (*smartphone* ou équivalent). Cette solution serait cependant contraignante pour l'utilisateur et imprécise (risques d'erreur).

avant de faire appel au réseau électrique, l'alimentation des équipements de la maison se fait grâce à la batterie du véhicule, si son état de charge le permet. À noter que, sur le lieu de travail, le véhicule ne joue pas le rôle de V2H.

**C) Ensemble des cas étudiés**

Outre les différentes modalités de charge, deux climats sont étudiés afin de mesurer l'influence de l'ensoleillement sur le dispositif : la famille Dupond vit soit à Trappes, soit à Carpentras, ce qui donne, compte tenu du rendement du système photovoltaïque (14%), une productivité solaire annuelle, lorsque les panneaux sont orientés de manière optimale, respectivement de 973 kWh et 1320 kWh par kW<sub>c</sub> (données météorologiques provenant de la base METEONORM 2012).

Deux types de trajet en semaine sont examinés : un trajet long de 50 km aller-retour (A/R) et un trajet court de 16 km A/R qui, selon l'INSEE, avoisinent respectivement la moyenne et la médiane de la distance domicile travail pour les salariés français (Baccaini *et al.*, 2007). Ce paramètre qui, comme on le verra, joue sur les bilans environnemental et économique de la mobilité solaire pour la famille Dupond est très important du point de vue du bilan global.

Rappel: une réduction de 80 kWh/m<sup>2</sup>/an dans l'habitat est annulée par 20 km parcourus en véhicule chaque jour pendant un an (Quénard, 2011). Les politiques publiques devront en tenir compte, notamment pour l'aménagement du territoire.

En supposant que le véhicule électrique ne soit pas utilisé le week-end, la combinaison de ces différents éléments conduit à analyser douze cas résumés dans le Tableau 1<sup>11</sup>.

Selon chaque cas, le dimensionnement de la surface de panneaux photovoltaïques est différent puisqu'il dépend des besoins à couvrir (équipements et/ou mobilité), de la zone géographique (quantité d'énergie fournie par unité de surface photovoltaïque) et de la longueur des déplacements conditionnant le besoin d'autonomie de la batterie. La surface du champ photovoltaïque varie ainsi de 24 à 50 m<sup>2</sup>, la fourchette haute pouvant paraître élevée notamment sur le toit d'une maison de 65 m<sup>2</sup>. En 2030, la technologie aidant, il est vraisemblable que les surfaces nécessaires à la même production énergétique seront plus petites. Sur le lieu de travail, comme on l'a vu, si le dispositif est installé, la surface dédiée au solaire est supposée constante et égale à 13 m<sup>2</sup>, ce qui correspond approximativement à la surface d'une place de parking.

Nous faisons l'hypothèse que la famille Dupond est propriétaire de l'installation photovoltaïque, de la prise de recharge (le cas échéant) et du véhicule électrique. En revanche, la batterie est supposée en *leasing* comme ce qui est proposé actuellement par

11. Des cas supplémentaires ont été simulés afin de mesurer l'influence de déplacements le week-end (50 km quotidiens) ainsi que celle d'une baisse de rendement des panneaux photovoltaïques (perte de 1% sur leur durée de vie).

Tableau 1

Différents cas de figure envisagés							
	Lieu de recharge du véhicule			Climat		Distance domicile/travail	
	Domicile	Travail	Domicile + travail	Trappes (Nord)	Carpentras (Sud)	50 km A/R	16 km A/R
1a	X			X		X	
1b		X		X		X	
1c			X	X		X	
1d	X				X	X	
1e		X			X	X	
1f			X		X	X	
2a	X			X			X
2b		X		X			X
2c			X	X			X
2d	X				X		X
2e		X			X		X
2f			X		X		X

certains constructeurs automobiles<sup>12</sup>. Un tel modèle d'usage est situé entre les deux cas extrêmes pouvant être envisagés en 2030 : équipement (système photovoltaïque, prise de recharge, véhicule et batterie) en totale propriété d'un côté et équipement entièrement loué de l'autre, étant entendu que les modèles en *leasing* peuvent comprendre des modalités d'auto-partage.

#### D) Hypothèses concernant la technologie associée à la mobilité solaire

N'ayant pas construit différents scénarios prospectifs pour attribuer des valeurs contrastées aux performances techniques, environnementales (empreintes carbone) et économiques des équipements considérés, on se base le plus souvent sur les fourchettes hautes des performances actuelles (excepté pour la durée de vie des panneaux solaires<sup>13</sup>), en se plaçant cependant dans une optique conservatrice et sans doute pessimiste pour 2030, étant donnés les progrès technologiques que l'on peut attendre. Choisir un cadre plutôt désavantageux est une manière de se couvrir

contre le risque de promouvoir un concept qui se révélerait non viable *a posteriori*.

Les modules photovoltaïques retenus sont de type cristallin d'une puissance de 140 Wc/m<sup>2</sup> (ce qui correspond aux standards actuels des modules du commerce). Le rendement entre la sortie en courant continu des modules photovoltaïques et le point en courant alternatif d'injection réseau a été fixé à 86 %. Il prend en compte le rendement de l'onduleur, les pertes dans les câbles et les déconnexions intempestives dues à la qualité du réseau. La durée de vie des panneaux photovoltaïques est estimée à 20 ans<sup>13</sup> et celle de l'onduleur à 10 ans.

Le véhicule électrique est une machine synchrone à aimant de durée de vie estimée à 10 ans<sup>14</sup>. La batterie est de type lithium-Ion, de capacité 25 kWh et de durée de vie égale à 10 ans. Son rendement de charge est supposé égal à 95 %, son rendement de décharge (vers le réseau ou le bâtiment) à 90 % et son

13. Cette hypothèse est très pessimiste car, actuellement, la plupart des fabricants garantissent leurs modules photovoltaïques à 25 ans et à 80% de leur rendement initial. Sauf analyse de sensibilité réalisée, nous ne considérons pas de baisse de rendement.

14. On se base sur l'âge moyen du parc automobile français qui est de 8 ans en 2008 (d'après CCFA, 2012). La durée de vie d'un véhicule est de 15 ans et sa durée de possession moyenne de 4 à 5 ans.

12. Chez Renault, la batterie est systématiquement en location. Le prix du forfait qui dépend de l'engagement et des kilomètres parcourus, est compris entre 82 et 148 €/mois pour la Renault Fluence ZE (source : www.renault.fr).

autonomie de 125 km. Ces performances, dans la fourchette haute à l'heure actuelle, seront vérifiées aisément en 2030. Sa consommation aux 100 km est estimée à 20 kWh<sup>15</sup>.

Le Tableau 2 récapitule les hypothèses faites pour le calcul des profils journaliers de production et de consommation, pour l'année 2030. Ce calcul a été réalisé par le CSTB grâce au logiciel TRNSYS<sup>16</sup>. Pour mémoire,

15. En réalité, cela dépend éminemment du style de conduite et de la typologie du chemin parcouru. Une seule valeur est retenue car, par souci de simplification, nous n'avons pas fait varier les données d'usage du véhicule, excepté son kilométrage.

16. TRaNsient SYstem Simulation.

est indiquée la valeur actuelle communément retenue pour 2012, sachant qu'elle masque une forte dispersion selon les technologies, les usages, etc. Il conviendra de réfléchir aux politiques à mettre en œuvre pour atteindre, voire infléchir les valeurs choisies pour 2030.

**E) Le cas de référence**

Les bilans environnementaux et économiques de la mobilité solaire sont calculés relativement à un cas de référence pour lequel la famille Dupond a les mêmes usages domestiques et des besoins de mobilité identiques. Cependant, sa maison ne dispose

Tableau 2	
Synthèses des hypothèses retenues pour 2030 et valeurs fréquemment retenues pour 2012	
<p><b>Production photovoltaïque (PV) et données liées au climat</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractéristiques du système PV : modules PV cristallin                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Puissance unitaire = 110 Wc/m<sup>2</sup> (2012) ; 140 Wc/m<sup>2</sup> (2030)</li> <li>○ Rendement du système : 86 % (2012) ; 86 % (2030)</li> </ul> </li> <li>• Données météo provenant de la base METEONORM 2012                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Sites considérés : Trappes et Carpentras</li> <li>○ Productivité solaire : 973 Wh/Wc à Trappes et 1320 Wh/Wc à Carpentras.</li> </ul> </li> <li>• Surface PV travail = 13 m<sup>2</sup> (place de parking)</li> <li>• Surface PV domicile : de 24 m<sup>2</sup> à 50 m<sup>2</sup> selon les cas analysés</li> <li>• Réseau 230 V 16 A avec puissance de recharge = 3 700 W</li> </ul>	<p><b>Batterie du véhicule électrique (VE)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacité de la batterie : 25 kWh (2012) ; idem (2030)</li> <li>• Technologie Li-Ion : 130 Wh/kg, 3000 W/kg (2012) ; idem (2030)</li> <li>• Rendement de charge : 90% (2012) ; 95% (2030)</li> <li>• Profondeur de décharge (DOD) : 90% (2012) ; idem (2030)</li> <li>• Rendement de décharge autorisé : 90% (2012) ; idem (2030)</li> <li>• Consommation : 200 Wh/km (2012) ; idem (2030)</li> <li>• Autonomie : 125 km (autonomie réelle de 112,5 km pour une DOD de 90%)</li> </ul>
<p><b>Consommation électrique du bâtiment</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basée sur relevés AIE                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Mesures faites en Angleterre entre 2003 et 2005</li> <li>○ Foyer type (surface habitable 65 m<sup>2</sup>, 3 personnes)</li> <li>○ Consommation totale an (électroménager, multimédia, éclairage) : 3 028 kWh</li> </ul> </li> <li>• Profils de consommation électriques sur une année, avec un pas de temps de 5 min</li> <li>• Durée de la simulation : 1 an</li> <li>• Les postes chauffage et eau chaude sanitaire ne sont pas pris en compte</li> </ul>	<p><b>Déplacements considérés et horaires de travail</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Déplacements domicile-travail                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Distance = 16 km A/R ou 50 selon les cas considérés</li> <li>○ Heures de présence au domicile : 18h-8h</li> <li>○ Heures de présence au travail : 8h30-17h30</li> <li>○ Déplacement : 1/2 h matin – 1/2 h soir</li> <li>○ Ecrêtage : 18h-22h ou décharge de la batterie dans la limite de la profondeur de décharge et du rendement de charge autorisés</li> <li>○ Recharge sur le réseau : 22h-8h</li> </ul> </li> </ul>

\* Depth of Discharge.

pas de panneaux photovoltaïques et son véhicule est un véhicule essence classique doté d'une hybridation lui permettant d'atteindre les objectifs d'émissions de 70 g/km en 2025. Les durées de vie du véhicule hybridé et de sa batterie (de capacité, 2 kWh) sont de 10 ans. Le Tableau 3 juxtapose le cas de référence avec celui de mobilité solaire étudié.

#### F) Les bilans environnementaux et économiques de la mobilité solaire

Pour effectuer les comparaisons environnementales et économiques de chaque cas de mobilité solaire avec la référence, on s'appuie sur les profils de consommation issus du logiciel TRNSYS, pour le véhicule électrique comme pour les équipements de la maison qui sont satisfaits soit par une production photovoltaïque, soit par le réseau. L'analyse a été faite sur une année entière, sur la base des données météorologiques METEONORM 2012, avec un pas de temps égal à 5 minutes. Les résultats obtenus concernent à la fois les échanges de puissance et d'énergie entre les différents postes de consommation et de production. Si, en moyenne sur l'année, la production photovoltaïque est largement supérieure à la consommation (sauf pour le cas recharge solaire au travail uniquement à Trappes pour 50 km A/R), à pas de temps plus réduit il est nécessaire d'avoir recours au réseau pendant 50% à 70% du temps (Cosnier, Quénard, Bougrain, 2013). Nous pouvons déjà conclure que, si l'on veut diffuser la mobilité solaire sur tout le territoire, il faudra viser, à l'échelle journalière, une meilleure adéquation entre la production et la consommation. Cela

se passe notamment par un meilleur pilotage de la recharge, voire une batterie de capacité encore améliorée.

#### G) Bilan CO<sub>2</sub><sup>équivalent</sup>

L'évaluation de l'empreinte carbone réalisée pour les cas étudiés tient compte du contenu CO<sub>2</sub> de la consommation électrique des équipements de la maison ainsi que des émissions de CO<sub>2</sub><sup>équivalent</sup> liées au cycle de vie des véhicules, dont on considère les deux postes les plus importants : leur fabrication et leur utilisation (carburant ou recharge de la batterie).

#### ● Contenu CO<sub>2</sub> des consommations électriques

Les consommations électriques sont satisfaites par le photovoltaïque ou par le réseau. Le contenu CO<sub>2</sub> de chaque kWh consommé via le réseau tient compte des contenus CO<sub>2</sub> propres aux moyens de production mobilisés (sur leur cycle de vie) pour fournir ce kWh. Il varie fortement sur un pas de temps très fin car la structure de la production électrique en France est caractérisée par une part importante en base faiblement carbonée (nucléaire, fil de l'eau, énergies renouvelables), une part en semi-base (gaz, charbon), mais surtout par un équilibre de l'offre avec la demande qui est opéré en période de pointe avec des moyens fortement carbonés. À chaque heure, les moyens de production appelés peuvent donc être très différents, ce qui implique un contenu CO<sub>2</sub> moyen horaire de la production fortement fluctuant avec une grande dispersion. L'utilisation de l'indicateur usuel du contenu

Tableau 3

Hypothèses retenues pour le cas de référence et le cas de mobilité solaire			
Cas	Habitat	Véhicule	Production électrique équipements et batterie
Référence	Équipements identiques	Thermique hybridé (70 g de CO <sub>2</sub> par km) Durée de vie = 10 ans	Réseau
Mobilité solaire (maison BEPOS)		Véhicule électrique Durée de vie = 10 ans	Photovoltaïque + réseau

CO<sub>2</sub> moyen annuel d'un kWh n'étant alors pas adaptée aux besoins de l'étude présente, nous envisageons une autre approche.

Nous retenons ici la méthode marginale. Cependant, l'étude d'autres méthodes existantes, basées sur un contenu CO<sub>2</sub> moyen à un pas plus fin et/ou utilisant des coefficients de saisonnalité (cf. méthode ADEME 2012, dédiée à l'évaluation du contenu CO<sub>2</sub> des usages), a permis de conclure à des résultats similaires.

La méthode marginale s'appuie sur le rôle de chaque catégorie d'énergie qui participe à tout instant à la production électrique. Tenant compte explicitement du *merit order*<sup>17</sup> (les informations réelles d'appel des centrales n'étant pas transparentes) ainsi que des contraintes techniques des différentes énergies (intermittence, disponibilité, flexibilité, temps de mobilisation, contenu carbone), elle fournit des résultats précis.

Une filière est considérée comme marginale lorsque sa technologie détermine le prix du marché. Sachant que l'on raisonne sur la production d'une année donnée, la dernière centrale appelée à chaque instant peut, au premier ordre, être considérée comme la filière marginale. Le contenu CO<sub>2</sub> d'un nouvel usage est ainsi calculé en identifiant sur un pas temporel le plus fin possible la production marginale correspondant à cette nouvelle consommation.

La précision de cette méthode permet de traiter des cas de petites variations, comme celle de la demande, que ce soit en augmentation ou en diminution. Le kWh marginal correspond alors au kWh qui est délivré (ou effacé) par

la dernière centrale appelée. Celle-ci est choisie parmi les centrales existantes disponibles au moment opportun en fonction d'un certain nombre d'éléments tels que son coût marginal, sa flexibilité, les contraintes réseaux... Comme il s'agit d'une petite variation, il n'y a pas de remise en question du parc de production.

Ce type d'approche est adapté au court terme, mais ne respecte pas le critère d'additivité<sup>18</sup>. On peut aboutir toutefois à un ordre de grandeur pertinent. Cependant, une étude à un horizon de plus long terme nécessiterait de tenir compte d'une évolution significative du parc de production (nouveaux investissements et rééquilibrage du parc face à une demande différente) pour aboutir à un contenu CO<sub>2</sub> marginal prospectif traduisant cette dynamique. Dans le cas présent, l'impact de cette hypothèse est faible car nous considérons la consommation d'une maison unique. Nous utilisons donc le parc actuel pour cette première approche, sachant que, dans la suite du projet, nous considérerons un parc projeté en 2030. Les valeurs retenues pour les contenus CO<sub>2</sub> par énergie sont celles retenues dans la méthode ADEME (2012), indiquées dans le Tableau 4.

Les données des moyens de productions appelés au pas horaire sur une année complète sont fournies par le site de RTE (année 2010).

● **Contenu CO<sub>2</sub><sub>équ</sub> des véhicules**

Nous utilisons les hypothèses suivantes du Tableau 5 pour le contenu carbone des véhicules électrique et de référence.

17. Classement des énergies par ordre de coût marginal croissant.

18. Critère suivant lequel la somme des émissions des différentes consommations des usages est égale aux émissions totales de la production.

Tableau n° 4			
Émissions de CO <sub>2</sub> par kWh produit			
Filière	Émissions (gCO <sub>2</sub> /kWh)	Filière	Émissions (gCO <sub>2</sub> /kWh)
Nucléaire	10	Gaz	406
Hydraulique	6	Divers	406
Solaire	55	Charbon	1038
Thermique renouvelable	36	Fuel	704
Éolien	7	Solde export	382 à 398

## ● Résultats

Les résultats sont présentés dans les Figures 3 et 4 pour les différents cas étudiés.

On constate tout d'abord que le bilan CO<sub>2</sub> est positif, dans des proportions similaires pour les deux types de cas (50 et 16 km A/R) : un gain variant de 24 à 46 %, se traduisant par des émissions évitées allant de 0,48 à 1,12 t par an, est ainsi constaté par rapport au scénario de référence. On voit aussi que ce bilan s'avère d'autant plus favorable au couplage que l'on recharge à la maison et au travail (cas c et f) ou que le climat est favorable (sud de la France) (cas d, e et f).

On observe donc un gain relatif significatif, lié à l'utilisation d'un véhicule électrique rechargé préférentiellement par du photovoltaïque. Ce gain est renforcé grâce à l'électricité photovoltaïque excédentaire restituée au réseau, permettant également de contribuer à décarboner la production électrique. Le cas traité dans cette étude, qui concerne un seul véhicule, ne permet pas d'avoir un impact significatif sur ce point. Mais un cas généralisé avec un parc important de véhicules électriques couplés à du solaire permettrait de délivrer une production photovoltaïque non négligeable qui se subsisterait à des énergies éventuellement plus carbonées.

Au final, nous obtenons un bilan qui dépend bien sûr des hypothèses retenues, dont certaines sont particulièrement influentes comme le choix des créneaux horaires utilisés pour la recharge de la batterie, la durée de vie du véhicule électrique et de sa batterie. Ce bilan

dépend également du contenu CO<sub>2</sub> d'1 kWh d'origine photovoltaïque dont la valeur est liée au type d'électricité, plus ou moins carbonée, utilisée pour la fabrication des panneaux et du système photovoltaïque, du CO<sub>2</sub> émis lors des procédés de fabrication du véhicule électrique et de la batterie. Enfin, le dimensionnement photovoltaïque initial conditionne la quantité d'électricité photovoltaïque restituée au réseau.

Avec l'évolution des progrès technologiques, certains de ces paramètres évolueront d'ici à 2030 dans un sens qui renforcera les gains obtenus ; ceux-ci pourraient être encore amplifiés par d'autres paramètres de nature différente comme le changement du mode de vie.

## H) Évaluation économique

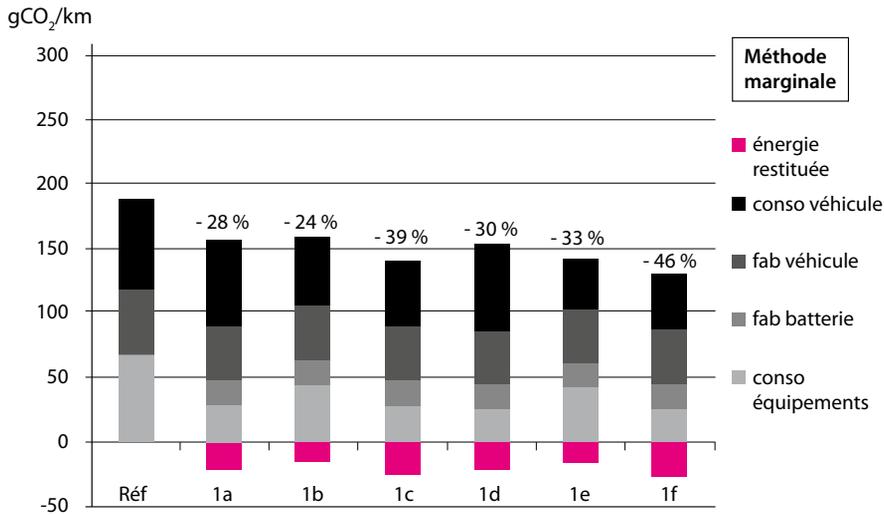
L'évaluation économique pour la famille Dupond repose à la fois sur l'analyse des investissements qu'elle doit consentir pour avoir recours à la mobilité solaire et sur leurs coûts d'utilisation. L'ensemble de ces coûts, appelé TCO (*Total Cost of Ownership*), est calculé dans un premier temps, puis ramené à un coût du kilomètre parcouru et enfin comparé à une situation de référence.

Dans l'étude réalisée ici, la batterie étant en *leasing*, les coûts d'investissement concernent le système photovoltaïque, le véhicule électrique et la borne de recharge si celle-ci est envisagée à domicile. Les cash-flows annuels sont liés à l'utilisation du véhicule et des équipements de la maison sur une durée de 20 ans. On suppose que le véhicule est revendu au bout de 10 ans à 30 % de sa valeur initiale et qu'un véhicule neuf est acheté pour le rempla-

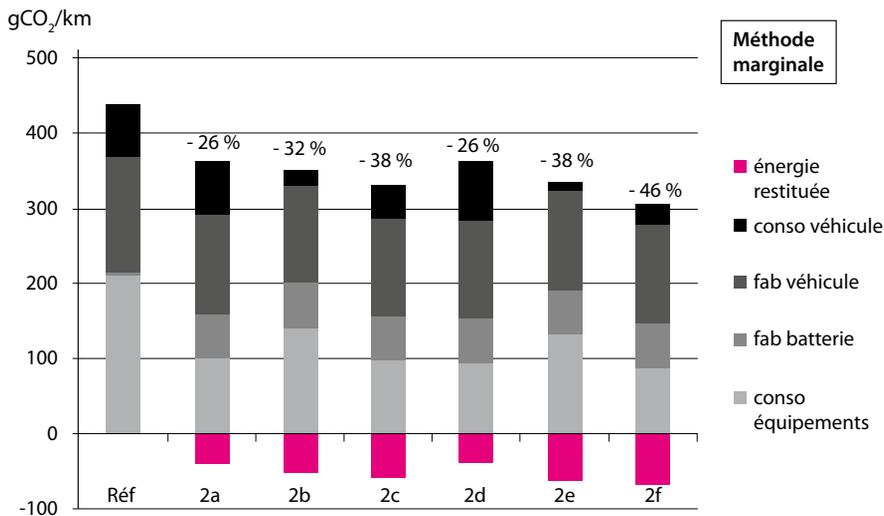
Tableau n° 5

Empreinte carbone retenue pour le comparatif		
Type véhicule	Thermique hybridé	Véhicule électrique
Fabrication véhicule*	6 400 kgCO <sub>2</sub> équiv	5 460 kgCO <sub>2</sub> équiv
Fabrication batterie 100 kgCO <sub>2</sub> /kWh Plage [56 – 200]**	1,5 g CO <sub>2</sub> /km pour 13 000 km/an 5 g CO <sub>2</sub> /km pour 4 000 km/an	19 g CO <sub>2</sub> /km pour 13 000 km/an 60 g CO <sub>2</sub> /km pour 4 000 km/an
Emissions à la consommation***	70 g CO <sub>2</sub> /km	-

\*Althaus HJ, Gauch M, 2010. \*\*CAS, 2011. \*\*\*Commission Européenne, 2007.



**Figure 3. Comparatif environnemental du couplage innovant véhicule électrique et système photovoltaïque avec le cas de référence pour les cas dont le trajet est de type 1 (50 km A/R) – comparaison en %.**



**Figure 4. Comparatif environnemental du couplage innovant véhicule électrique et système photovoltaïque avec le cas de référence pour les cas dont le trajet est de type 2 (16 km A/R) – comparaison en %.**

cer. La valeur résiduelle au bout de 20 ans des panneaux photovoltaïques est supposée nulle et nous considérons un changement de l'équipement onduleur au bout de 10 ans (réinvestissement).

Les calculs économiques sont effectués en euros constants. Le taux d'inflation n'est donc pas considéré. Quant au taux d'actualisation

annuel, il est supposé égal à 5 %, ce qui le situe dans la fourchette de 5 à 7 % généralement retenue pour les particuliers.

**● Coûts d'investissement supposés pour 2030**

À long terme, après que les coûts d'investissement ont été amortis et que les volumes

de production ont rejoint ceux du standard automobile, le coût du véhicule électrique sans la batterie va tendre vers celui du véhicule thermique hybridé. Pour estimer le coût d'investissement du véhicule électrique, on se base sur la valeur de 27 €/kW pour l'ensemble machine et électronique de puissance (JRC, Eucar, Concauwe, 2008). C'est une valeur pour 2008 qu'il faudrait projeter en 2030, en tenant compte à la fois du progrès technique (courbes d'apprentissage...) et de l'évolution du coût des matières premières rentrant dans la fabrication du véhicule.

On considère ainsi le coût actuel comme la référence pour 2030, ce qui conduit à un montant d'investissement de 21 k€ pour le véhicule électrique sans la batterie. Le prix du véhicule de référence, hybride essence, avec sa batterie de 2 kWh est estimé à 22 k€.

Concernant les panneaux photovoltaïques, deux tranches ont été considérées pour le coût du matériel posé (Tableau 6).

Tableau 6	
Estimations du coût d'investissement des systèmes photovoltaïques intégrés au bâti résidentiel en 2030 (source : NREL, 2012)	
Puissance	Coût d'investissement
< 3 kWc	1,5 €/Wc
> 3 kWc	1,2 €/Wc

L'onduleur, nécessaire au fonctionnement du système photovoltaïque, doit être remplacé au

bout de 10 ans et représente un investissement d'un montant approximatif de 1 k€ quelle que soit la taille des panneaux considérés<sup>19</sup>. Quant à la borne de recharge, elle est estimée à 1 k€ avec une durée de vie de 20 ans.

### ● Coûts d'exploitation

Trois postes sont à considérer :

- la dépense énergétique: elle inclut la consommation en électricité provenant du réseau (la revente étant identifiée à part) pour le véhicule électrique et pour les usages domestiques. Ces derniers rentrent en effet dans le calcul du TCO global puisque les équipements de la maison bénéficient aussi de l'électricité photovoltaïque. Afin de ne pas avoir à considérer le comportement de l'utilisateur (Mme Dupond) optimisant son lieu de recharge en fonction du prix de l'électricité, on considère que le prix de l'électricité de la recharge au travail est le même qu'au domicile (contrat différent pour l'industriel suivant l'alimentation du parking ou, le cas échéant, de son processus de production).

- les dépenses de maintenance sur les véhicules et les panneaux photovoltaïques.

- le coût du *leasing* pour la batterie du véhicule.

#### – Dépense énergétique

Une évolution entre 2030 et 2050 du prix de l'essence basée sur celle du prix du brut entre 140 \$ et 200 \$ (de l'année 2010) a été retenue

19. Cette hypothèse est simplificatrice car le coût de l'onduleur augmente avec la taille des panneaux.

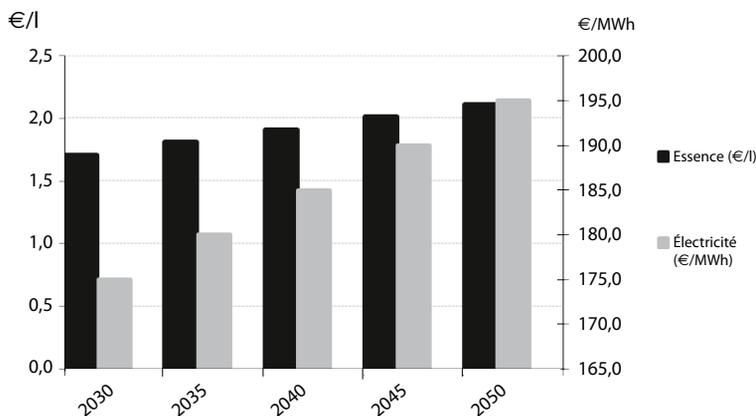


Figure 5. Évolution des prix de l'essence et de l'électricité en France (source : IFPEN).

en préservant la fiscalité actuelle. Cela conduit à un taux de croissance annuel moyen du prix de l'essence de 1,1 % sur la période 2030-2050. Quant à celui de l'électricité, il est supposé égal à 0,5 % sur cette période (voir Figure 5), l'augmentation ayant été plus vive la période précédente (1,9 % de 2010 à 2030) du fait des investissements réalisés. Ces hypothèses, qui jouent fortement sur la rentabilité de la mobilité solaire, auraient besoin d'être affinées, voire discutées selon différents scénarios de politique énergétique. Cela fera l'objet de la suite du projet.

Les consommations annuelles du véhicule électrique et du domicile proviennent de simulations effectuées avec le logiciel TRNSYS. Celles du véhicule de référence sont dérivées du respect par ce véhicule d'une norme à 70 g CO<sub>2</sub>/km dès 2025, ce qui se traduit par une consommation de l'ordre de 3,2 litres aux 100 km.

– *Dépense de maintenance*

Pour le véhicule électrique, plusieurs études considèrent des coûts de maintenance sensiblement réduits du fait de la simplicité de la motorisation et du freinage récupératif. Nous avons considéré des frais de maintenance réduits de 50 % et donc de l'ordre de 300 € par rapport au véhicule de référence hybride essence qui nécessite 600 € de maintenance annuelle (INSEE, 2005).

Les coûts de maintenance des panneaux photovoltaïques sont basés sur leur surface et donc sur la puissance photovoltaïque associée. Ils ont été calculés par extrapolation linéaire à partir des valeurs connues pour des puissances intermédiaires (Tableau 7).

Ces coûts sont affectés à l'utilisateur si les panneaux sont installés à domicile et supportés par l'employeur s'ils le sont sur le lieu de travail.

Tableau 7	
Coûts annuels de maintenance des panneaux photovoltaïques (source : INES)	
Puissance	Coût annuel de maintenance (€/an)
2,72 kWc	60
4,96 kWc	100
6,72 kWc	140

– *Coût du leasing batterie*

Nous avons retenu une valeur de 300 €/kWh comme coût de base pour les packs batteries embarqués sur les véhicules électriques de 2030 ainsi que pour le véhicule de référence (Syrota, 2008). Cela reste une hypothèse assez conservatrice puisque de nouvelles annonces sont faites régulièrement, citant des chiffres plus bas (Howell, 2009). Considérant une valeur résiduelle de la batterie de 60 €/kWh en fin de vie<sup>20</sup> (soit 20% de sa valeur originelle) et un taux d'emprunt égal au taux d'actualisation (5%/an), le loyer pour une durée de *leasing* de 10 ans est évalué à 825 € annuels<sup>21</sup>.

● *Coûts de production photovoltaïque*

Avec les hypothèses ci-dessus, nous pouvons vérifier si l'hypothèse d'une parité réseau en 2030 est validée en estimant le coût moyen actualisé d'un kWh d'origine photovoltaïque pour chaque cas étudié. Les résultats donnés dans le Tableau 8 confirment que la parité réseau sera déjà bien atteinte à cet horizon pour tous les cas étudiés.

20. On peut imaginer une seconde vie pour la batterie du véhicule électrique : celle d'une batterie stationnaire.

21. À noter, que le loueur de batterie pourrait demander à être rémunéré en sus pour la fonction V2H de la batterie.

Tableau 8												
Coûts de production du photovoltaïque à l'horizon 2030 pour les cas étudiés avec les hypothèses technico-économiques retenues												
Cas	1a	1b	1c	1d	1e	1f	2a	2b	2c	2d	2e	2f
Coût kWh en c€	13	15	13	10	14	10	14	15	14	11	14	11

**Tableau 9**

**Hypothèses retenues pour le calcul du TCO en 2030 et valeurs fréquemment retenues pour 2012**

	<b>Mobilité solaire 2012</b>	<b>Mobilité solaire 2030</b>	<b>Mobilité hybride 2012</b>	<b>Mobilité hybride 2030 (référence)</b>
<b>Investissements</b>				
Coût achat borne de recharge domicile	1,4 k€	1 k€	-	-
Coût achat véhicule électrique sans batterie	21 k€	21 k€	-	-
Coût achat véhicule hybride avec batterie	-	-	22 k€	22 k€
Coût batterie incluse dans le coût véhicule hybride	-	-	500 €/kWh	300 €/kWh
Coût batterie pour l'acteur qui la loue à l'utilisateur	500 € à 600 €/kWh	300 €/kWh	-	-
Coût machine et électronique de puissance pour véhicule électrique	27 €/kW	27 €/kW	-	-
Coût onduleur	1 k€	1 k€	-	-
Coût système PV de puissance < 3 kWc intégré au bâti	2,3 €/Wc Source européenne EPIA* - fourchette haute	1,5 €/Wc	-	-
Coût système PV de puissance > 3 kWc intégré au bâti	1,9 €/Wc Source européenne EPIA - fourchette haute	1,2 €/Wc	-	-
Durée de vie borne de recharge	20 ans	20 ans	-	-
Durée de vie onduleur	10 ans	10 ans	-	-
Durée de vie modules PV	25 ans	20 ans	-	-
Durée de vie véhicules électrique et hybride	?	10 ans	Moyenne d'âge du parc essence français en 2008 = 8 ans	10 ans
Valeur résiduelle batterie pour l'acteur qui la loue à l'utilisateur	-	60 €/kWh	-	-
Valeur résiduelle onduleur au bout de 10 ans	0	0	-	-
Valeur résiduelle panneaux au bout de 20 ans	0	0	-	-
Valeur résiduelle véhicule au bout de 10 ans	30 % de 21 k€	30 % de 21 k€	30 % de 22 k€	30 % de 22 k€
<b>Utilisation</b>				
Baisse de rendements modules PV	20 % sur 25 ans	0 % ou 20 % sur 20 ans selon simulations	-	-
Consommation aux 100 km	20 kWh	20 kWh	4 à 4,5 litres essence	3,2 litres essence
Frais de maintenance annuels véhicules	-	300 €	600 €	-
Frais maintenance annuels système PV supportés par le particulier à la maison et l'employeur au travail	-	de 60 à 140 € selon la puissance	-	-
Loyer mensuel batterie	80 à 150 €	69 €	0	0
Prix électricité réseau	13 c€/kWh	18 c€/kWh	13 c€/kWh	18 c€/kWh
Prix essence	-	-	1,3 €/l	1,7 €/l
Prix revente électricité au réseau	Supérieur prix achat du kWh	Parité réseau	-	-
Taux croissance annuel prix électricité sur 2010-2030		1,9 %		
Taux croissance annuel prix électricité sur 2030-2050		0,5 %		
Taux croissance annuel prix essence sur 2010-2030		1,5 %		
Taux croissance annuel prix essence sur 2030-2050		1,1 %		
<b>Facteurs économiques</b>				
Inflation	non considérée (calcul en euros constants)			
Taux d'actualisation	5 %			

\* European Photovoltaic Industry Association.

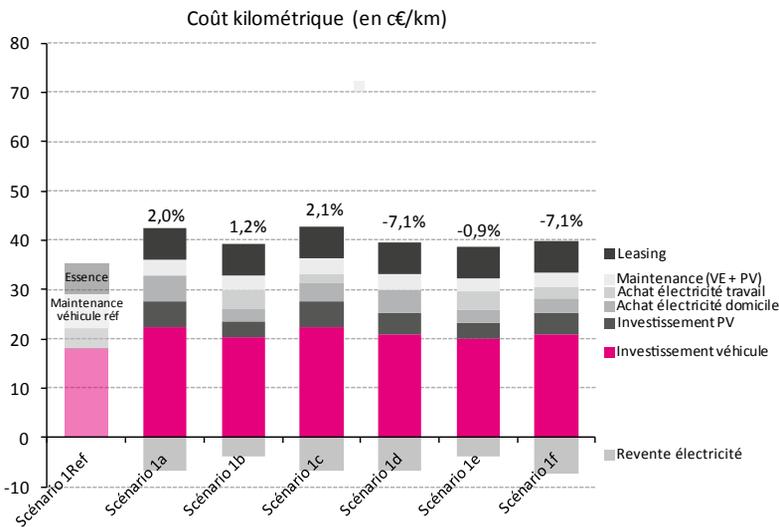
Dans les cas étudiés, Mr et Mme Dupond payent le kWh photovoltaïque moins cher lorsque le véhicule peut se recharger sur le lieu de travail puisque l'investissement associé est entièrement pris en charge par l'employeur.

Le Tableau 9 récapitule les données utilisées en sus de celles du Tableau 2.

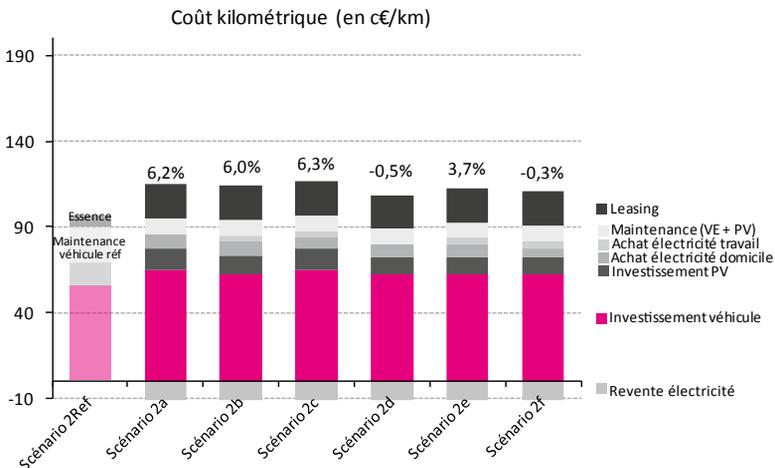
● **Résultats**

Afin de pouvoir les comparer, les coûts ont été ramenés au kilomètre. L'unité est le centime d'euro (de l'année 2010) par kilomètre. Les Figures 6 et 7 en présentent les résultats.

Les résultats de TCO ramené au kilomètre parcouru montrent qu'en 2030 la mobilité solaire sera compétitive par rapport à une mobilité basée sur un véhicule thermique hybridé pourtant très économe (3,2 l/100 km et 70 gCO<sub>2</sub>/km). Les écarts de coût entre les trajets de type 1 et ceux de type 2 montrent bien que le kilométrage est très important dans ces bilans. Avec 16 km de trajets quotidiens, le véhicule électrique est très légèrement plus cher à l'usage en moyenne ; avec 50 km quotidiens, il se rapproche fortement de la référence. Dans ce deuxième cas, la famille



**Figure 6. Coûts kilométriques pour les cas dont les trajets domicile travail sont de type 1 (50 km A/R) et comparaison avec le cas de référence (%).**



**Figure 7. Coûts kilométriques pour les cas dont les trajets domicile travail sont de type 2 (16 km A/R) et comparaison avec le cas de référence (%).**

Dupond peut réduire notablement son budget voiture en économisant par exemple jusqu'à près de 4 400 € par an (cas 1d).

Très naturellement, le bilan économique est meilleur dans le sud que dans le nord de la France puisque la surface photovoltaïque peut y être réduite, limitant le montant de l'investissement associé et accroissant les quantités d'énergie récupérées (moins d'appel au réseau et davantage de vente d'électricité solaire).

Ce bilan dépend également du prix des énergies. Par exemple, le prix de l'essence est une variable essentielle dans cette comparaison. En effet, la compétitivité du cas 1e est remise en cause avec une seule baisse de 10 % du prix de l'essence. Un moyen possible pour favoriser cette compétitivité serait de maintenir un prix plus élevé de l'essence via un ajout de taxes destinées à subventionner le développement de la mobilité solaire (aide à l'investissement).

Une prise en compte du vieillissement des infrastructures photovoltaïques est possible via la simulation d'une baisse d'efficacité des panneaux. Sur le bilan total, une baisse de 1% de rendement par an engendre une augmentation du coût du kilomètre parcouru comprise entre 1,7 et 3,2 % suivant le cas retenu.

## 2. Quelles politiques d'innovation pour généraliser la mobilité solaire à la France entière ?

Sous des hypothèses assez conservatrices retenues en 2030, et en supposant que la parité réseau de l'électricité photovoltaïque est atteinte à cet horizon, les simulations réalisées pour traiter différents cas de figure concernant les modalités de recharge (somme toute assez contraintes), l'ensoleillement et un besoin de mobilité bien régulier sur l'année, montrent que la compétitivité économique de la mobilité solaire est avérée pour une famille vivant dans une maison à énergie positive (norme BEPOS). En outre, le bilan CO<sub>2</sub> est positif par rapport au cas de référence retenu, *i.e.* une maison non productrice d'énergie avec un véhicule essence hybridé faiblement émetteur de gaz à effet de serre. La prise en compte

pour trois des cas étudiés d'une utilisation supplémentaire du véhicule électrique pendant le week-end<sup>22</sup> renforce encore les gains relatifs déjà obtenus, aussi bien sur le plan économique qu'environnemental. Nous n'avons pas exploité les avantages en termes de chauffage de la maison BEPOS de 2030 car nous nous sommes focalisés uniquement sur les usages de l'électricité pour les équipements de la maison, *i.e.* électroménager, multimédia, éclairage et véhicule électrique, s'il peut être rechargé à domicile. Les bilans économiques et environnementaux comparatifs devraient être meilleurs pour la famille si l'on intégrait le poste chaleur dans l'analyse. Il en serait de même, si les valeurs des paramètres étaient projetées en 2030, en tenant mieux compte des progrès technologiques.

Pendant, s'il y avait dissémination à l'échelle de la France de ce couplage, on peut se demander si les résultats seraient transposables par homothétie. En effet, la généralisation de la mobilité électrique fait courir le risque de surcharger le réseau à la pointe et, par conséquent, d'augmenter les rejets de CO<sub>2</sub> avec une intensité d'autant plus forte que le mix électrique tendrait à être plus carboné.

Il faudrait alors optimiser le temps de charge à des moments où le réseau est peu sollicité. Cela imposerait d'immobiliser le véhicule longtemps pour le recharger de façon optimale. Mais, comme les résultats économiques le montrent, il faut rouler beaucoup pour rentabiliser l'investissement particulier... Il faut rouler plus et être arrêté longtemps au bon moment pour la recharge !

La question qui se pose est donc de mettre au point des politiques publiques capables de résoudre ce dilemme, en gardant aussi à l'esprit que, pour ne pas alourdir le bilan CO<sub>2</sub> global, il ne faut pas augmenter le nombre global de kilomètres parcourus par les Français et réfléchir à un aménagement du territoire qui soit durable en limitant l'étalement urbain (surfaces agricoles préservées, forêts, espaces verts...).

Ainsi, pour minimiser les impacts environnementaux et diminuer les impacts négatifs

22. 50 km parcourus, le samedi comme le dimanche.

potentiels sur le réseau, il faut imaginer des politiques spécifiques à la mobilité solaire embrassant toute la problématique de la convergence habitat, transport et réseau. L'idée serait de promouvoir un couplage intelligent où le véhicule électrique mettrait sa capacité de stockage au service du gestionnaire de réseau (ou d'un agrégateur d'effacement) et où une meilleure adéquation journalière s'opèrerait entre la production et la consommation.

Il conviendrait alors d'encourager le déploiement de systèmes de gestion d'énergie intelligents à l'échelle des bâtiments (ou des lotissements) et de stations de recharge accompagnées d'une prise en compte efficace des véhicules électriques. Une évolution normative à coût technique minimal est possible pour aller dans ce sens. Il faudrait que, dès lors le véhicule est connecté à la prise, l'état de charge de sa batterie soit connu du système de gestion d'énergie amont. En 2030, l'échange d'informations entre le véhicule et le système de recharge ne devrait plus avoir d'entrave (prise normalisée, *smart-grid* et généralisation des fonctions du véhicule en mode V2G).

On notera également qu'une autre information critique pour une bonne gestion d'énergie est l'heure souhaitée ou impérative de remise à disposition du véhicule après recharge. Cette information ne pouvant être fournie que par l'utilisateur, des conditions tarifaires peuvent être mises en place afin d'inciter l'utilisateur à «jouer le jeu»: un usager pressé devrait payer plus cher ! ■

## Bibliographie

- ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), 2012, «Évaluation du contenu en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) des différents usages de l'électricité distribuée en France métropolitaine entre 2008 et 2010». Rapport méthodologique interne, 24 février.
- Allthaus H.-J., Gauch M., 2010, «*Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen*», Empa, Dübendorf, Switzerland.
- Baccaini B., Sémécurbe F., Thomas G., 2007, «Les déplacements domicile-travail amplifiés par la périurbanisation», INSEE Première, n° 1129, mars.
- CAS (Centre d'analyse stratégique), 2011, «La voiture de demain : carburants et électricité», n° 37, La Documentation Française.
- CCFA (Comité des constructeurs français d'automobiles), 2012, «La croissance du parc automobile français en 2011», juillet.
- CGDD (Commissariat général au développement durable), 2011, Rapport de la commission des comptes du logement, ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.
- Commission Européenne, 2007, Texte connexe du paquet énergie-climat européen sur les normes d'émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules.
- Commission Européenne, 2010, Energie 2020, «Stratégie pour une énergie compétitive, durable et sûre».
- Cosnier M., Quénard D., Bougrain F., 2013, Étude de cas du concept «Voiture électrique couplée au solaire PV intégré au Bâtiment» à l'horizon 2030, Rapport CSTB pour le projet POLINOTEN, Convention de financement n° 11 94 C 0014.
- De Boncourt M., 2011, "The electric vehicle in the climate change race tortoise, hare or both?", IFRI, janvier.
- DGEC (Direction générale de l'énergie et du climat), 2012, Repères, «Chiffres clés de l'énergie», Service de l'observation et des statistiques.
- DGEC, 2013, Repères, «Chiffres clés du climat France et Monde», Service de l'observation et des statistiques.
- Howell, D., et al., 2009, "Battery Requirements for Plug-In Hybrid Electric Vehicles – Analysis and Rationale", National Renewable Energy Laboratory.
- INSEE, 2005, R. Arthaut, «Le budget transports des ménages depuis 40 ans».
- JRC (Joint Research Centre), EUCAR, CONCAWE, 2008, "Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context WELL-TO-TANK", Report Version 3.0.
- Knight I., Kreutzer N., Manning M., Swinton M., H. Ribberink, 2007, "European and Canadian non-HVAC electric and DHW load profiles for use in stimulating the performance of residential cogeneration systems", Annex 42 of the International Energy Agency – Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, May.
- Marcoux Y., Quénard D., Chupin D., 2010, «Le véhicule électrique : un nouvel équipement de la maison», Congrès SFT (Société française de thermique), 24-28 mai 2010, Le Touquet.
- MEEDDM (ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer), MEIE, 2010, «Charte pour le déploiement d'infrastructures publiques de recharge des véhicules électriques».
- NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2012, Alan Godrich, Ted James, Michael Woodhouse, "Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities", February.
- Quénard D., 2006, «Le bâtiment à énergie positive», *La Recherche*, n° 398, pp. 44-49, juin.
- Quénard D., 2008, «Vers l'autonomie énergétique», *La Recherche*, n° 415, 76-79, janvier.
- Quénard D., 2011, «Se loger, se déplacer : peut-on se libérer de l'addiction aux énergies fossiles ?», in Dinh-Audouin M.-T., Olivier D., P. Rigny, *La chimie et l'habitat*, pp. 151-171, EDP Sciences, Les Ulis.
- Site RTE (Réseau de transport d'électricité) : <http://clients.rte-france.com/lang/fr/visiteurs/vie/telecharge.jsp>