



N° 1846

ASSEMBLÉE NATIONALE
CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

TREIZIÈME LÉGISLATURE

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale le 16 juillet 2009

RAPPORT D'INFORMATION

DÉPOSÉ

en application de l'article 145 du Règlement

PAR LA COMMISSION DES AFFAIRES ÉCONOMIQUES

sur l'énergie photovoltaïque

ET PRÉSENTÉ

PAR M. Serge POIGNANT,

Député.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
CHAPITRE I : PRINCIPE ET INDUSTRIE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	11
I.— LE POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DU SOLEIL, UNE RICHESSE INÉPUISABLE	12
I.1.— LA MAITRISE DE LA SOURCE SOLAIRE, UN DEFI A RELEVER	15
I.2.— UNE ENERGIE PARTOUT PRESENTE MAIS INEGALEMENT REPARTIE	17
I.3.— UNE ENERGIE PAR NATURE INTERMITTENTE QUI NECESSITE DES CAPACITES DE STOCKAGE	19
II.— L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE, UNE TECHNOLOGIE EN EVOLUTION	20
II.1.— LA THEORIE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE	21
II.2.— LES MATERIAUX DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE	23
A. La filière historique : le silicium cristallin	24
<i>a) Le silicium : usage, avantages et inconvénients</i>	24
<i>b) Le silicium monocristallin</i>	27
<i>c) Le silicium multicristallin</i>	28
B. La filière innovante : les couches minces	28
<i>a) Les couches minces de silicium</i>	29
<i>b) Le tellure de cadmium (CdTe)</i>	30
<i>c) Le di-séléniure de cuivre-indium (CIS)</i>	31
C. Les filières de demain : polymères et concentrateurs.....	32
D. Un positionnement à déterminer	32
II.3.— UN PARC MONDIAL EN CROISSANCE EXPONENTIELLE.....	34
II.4.— UNE ENERGIE BIENTOT ECONOMIQUEMENT RENTABLE : LA MARCHÉ VERS LA PARITE RESEAU	37
III.— LE PHOTOVOLTAÏQUE, UNE SOURCE D'ÉNERGIE MULTIFORME	42
III.1.— LES FERMES SOLAIRES, DES CENTRALES ELECTRIQUES D'UN TYPE NOUVEAU	43
A. Des avantages incontournables	44

B. La problématique foncière	45
III.2.— LES GRANDES TOITURES, UNE PRODUCTION CONSEQUENTE DECENTRALISEE	47
III.3.— LE PHOTOVOLTAIQUE CHEZ LES PARTICULIERS.....	48
A. Un marché classique : l'habitat isolé.....	48
B. Un marché en plein développement : l'habitat connecté au réseau	49
CHAPITRE II : L'ACTION PUBLIQUE AU SOUTIEN DU DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	53
I.— DES SYSTÈMES PUBLICS DE SOUTIEN DANS LA PLUPART DES PAYS DÉVELOPPÉS	54
I.1.— APERCU GENERAL DE L'ENSEMBLE DES SYSTEMES EUROPEENS DE PROMOTION DU PHOTOVOLTAIQUE	55
I.2.— LE MIRACLE DU PHOTOVOLTAIQUE ALLEMAND.....	57
A. L'Allemagne, place forte du photovoltaïque	58
B. Pourquoi le photovoltaïque en Allemagne ?	59
C. Un engagement législatif pour un tarif adapté au marché.....	60
D. Des choix stratégiques : le surimposé au bâti	62
I.3.— DES CHATEAUX PHOTOVOLTAIQUES EN ESPAGNE	64
A. Un succès inattendu en 2008	64
B. Une catastrophe économique en 2009.....	65
C. Les leçons d'un échec.....	68
II.— ÉTAT DES LIEUX DE LA RÈGLEMENTATION FRANÇAISE	69
II.1.— LE TARIF D'ACHAT, UN ELEMENT CLASSIQUE DE SOUTIEN A LA FILIERE	70
A. La distinction entre équipement intégré et non intégré	71
B. Repenser le tarif d'achat	73
a) <i>Instituer une catégorie intermédiaire ?</i>	<i>73</i>
b) <i>Poser une règle de dégressivité ?</i>	<i>74</i>
c) <i>Régionaliser le tarif ?</i>	<i>75</i>
C. Les moyens d'une ambition : la contribution au service public de l'électricité.....	77
II.2.— UN DISPOSITIF FISCAL INCITATIF ET EN COURS DE CONSOLIDATION.....	77
A. Le crédit d'impôt, un élément majeur pour les particuliers	78
B. Des avantages dans les autres formes de prélèvement fiscal	79
C. Un flou persistant sur le régime des fermes solaires	79

II.3.— UN CADRE ADMINISTRATIF INSUFFISAMMENT PERFORMANT	80
A. Un manque d'unité dans la doctrine administrative.....	80
a) <i>Les fermes solaires nécessitent-elles un permis de construire ?</i>	81
b) <i>Comment juger l'intégration au bâti ?</i>	82
B. La nécessaire réduction des délais de raccordement.....	83
III.— UN CHOIX STRATÉGIQUE POUR LA FRANCE : L'INTÉGRATION AU BÂTI ET LA PRODUCTION RÉPARTIE	85
III.1.— UN CHOIX ECONOMIQUE COHERENT.....	87
III.2.— PREVENIR LES CONFLITS D'USAGE ET LA SPECULATION FONCIERE	88
III.3.— REPENSER LE RESEAU	89
III.4.— FAVORISER LA COOPERATION INTERNATIONALE TOUT EN VEILLANT A LA SECURITE ENERGETIQUE NATIONALE	90
CHAPITRE III : STRUCTURER UNE FILIÈRE FRANÇAISE PHOTOVOLTAÏQUE	92
I.— UNE RECHERCHE FRANÇAISE PERFORMANTE.....	93
I.1.— DES CENTRES DE RECHERCHES RENOMMES AUX BUDGETS ET AUX TRAVAUX CONVAINCANTS	95
A. L'INES et la filière silicium.....	95
B. L'IRDEP de Chatou et les couches minces CIS	97
C. Les petites équipes.....	97
I.2.— UN ENGAGEMENT IMPORTANT DE L'ANR	97
I.3.— DE LA RECHERCHE A L'APPLICATION	100
A. Solar Nano Crystal, du laboratoire à la chaîne de montage.....	100
B. Le PASS Innovation du CSTB.....	101
II.— DES CAPACITÉS INDUSTRIELLES ENCORE LIMITÉES	102
II.1.— LE GLORIEUX PASSE FRANCAIS	103
II.2.— UN RETARD DESORMAIS PATENT DANS LES CAPACITES DE PRODUCTION	103
II.3.— LES ACTEURS FRANÇAIS DU SECTEUR ET LEURS LACUNES.....	105
A. La production de silicium et le projet SILPRO.....	107
B. La production de plaquettes	108
II.4.— LA MOBILISATION ATTENDUE DES CHAMPIONS DE LA CONSTRUCTION ET DE L'ENERGIE.....	109
III.— UNE PÉDAGOGIE DE LA CONFIANCE ENVERS LE GRAND PUBLIC	110
III.1.— INFORMER LA POPULATION	111

III.2.— AMELIORER LA FORMATION DES PROFESSIONNELS DU SECTEUR	113
III.3.— DEVELOPPER DES GARANTIES ASSURANTIELLES ET NORMATIVES CONTRE LES MALFACONS	115
<u>NEUF LIGNES DIRECTRICES POUR UN PROGRAMME NATIONAL DE DEVELOPPEMENT DE LA FILIERE PHOTOVOLTAÏQUE</u>	117
EXAMEN EN COMMISSION	119
LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES	127

MESDAMES, MESSIEURS,

Les questions énergétiques constituent le grand enjeu de l'avenir. Elles embrassent l'ensemble des problématiques qui se posent à nous et se déclinent en autant de matières qu'il y a de champs politiques. Si l'on évoque l'indépendance nationale et l'autonomie de décision d'un Etat, on aborde forcément tôt ou tard ses sources d'approvisionnement en énergie et les négociations commerciales qu'elles induisent. Quand on mentionne la grande lutte engagée contre le changement climatique et pour la préservation des ressources, on ne peut négliger les consommations irraisonnées d'énergie ni le droit fondamental de tout être humain à y avoir accès. C'est une donnée forte des relations géostratégiques autant qu'un secteur économique générateur de richesses et d'emplois.

Le présent rapport a pour ambition, non de traiter l'ensemble des thématiques relatives au secteur de l'énergie, mais de les attacher à une source d'électricité particulière. L'énergie photovoltaïque désigne en effet l'électricité produite à partir du rayonnement solaire. Elle est relativement jeune. Découverte il y a moins d'un siècle dans son principe, maîtrisée à l'orée des années 1950 à peine, elle avait depuis été cantonnée à la conquête spatiale, seule à même de supporter ses coûts imposants. Sur Terre, d'autres méthodes de production électrique étaient toujours moins onéreuses : les hydrocarbures, l'atome, l'hydroélectrique, et même l'éolien.

L'énergie solaire – thermique cette fois – avait pourtant suscité un grand espoir à la fin des années 1970 et au début des années 1980, lorsque les chocs pétroliers avaient conduit les pays occidentaux à explorer de nouvelles voies pour se libérer de l'emprise du cartel de l'OPEP. Las, les premières exploitations n'avaient guère donné satisfaction. La retombée des prix de l'or noir avait brisé le fragile élan de recherche-développement et éloigné l'horizon de rentabilité des technologies. En France, les quelques tentatives d'utilisation du rayonnement solaire à des fins de production électrique étaient abandonnées avec le contre-choc pétrolier de 1986. La centrale Thémis, entre autres, fermait alors ses portes. On ne parlait plus du solaire que comme d'un mirage, sauf à équiper des zones très isolées, à des distances prohibitives des réseaux de distribution.

Deux décennies ont passé. L'énergie solaire en général, et l'énergie photovoltaïque en particulier, ne sont plus des illusions. La contrainte a changé de nature. Le monde n'est plus confronté à une menace économique sur ses sources d'approvisionnement, mais à un péril climatique et environnemental autrement plus impérieux. Depuis le sommet de Rio de 1992 et le protocole de Kyoto de 1998, chacun a pris conscience que la consommation irraisonnée des matières premières par l'humanité et les émissions carbonées qui en résultent engagent, à moyen et long terme, l'équilibre de la planète et l'avenir de l'humanité. Les experts du GIEC sont parvenus à convaincre jusqu'aux plus réticents que le temps d'un engagement fort en faveur de la préservation des ressources naturelles n'avait que trop tardé. Des conventions internationales ont formalisé cet objectif commun à l'ensemble des Etats, que tous ont décliné à l'intérieur des zones régionales et des frontières nationales. Alors que l'Europe s'est prononcée en faveur du *Facteur Quatre* et du *Triple Vingt*, alors que la France a pris l'initiative dans le cadre du Grenelle de l'environnement de s'assigner des objectifs plus élevés encore en termes d'électricité de source renouvelable (proportion portée de 20 % à 23 %) et d'efficacité énergétique, la tenue à la fin de l'année du sommet de Copenhague voué à définir les engagements de l'après Kyoto plaide avec d'autant plus de vigueur pour un effort concerté et soutenu en faveur d'un changement des habitudes énergétiques.

Réduire la consommation d'électricité et l'intensité énergétique est une solution pour préserver la planète. Elle n'est pas la seule. Le développement de moyens de production alternatifs en est une autre. S'il est question de réduire les émissions de gaz polluants et de protéger l'environnement de la dissémination des déchets, la France peut déjà se féliciter d'avoir privilégié l'option nucléaire. Elle doit maintenant investir dans les énergies renouvelables, comme elle s'en est assigné l'ambition.

D'aucuns pourraient y voir une forme de corvée, une épreuve à laquelle il serait nécessaire de sacrifier au nom de la responsabilité de la France dans les affaires du monde. Or ce n'est pas le cas. L'obligation de développer la production d'électricité est une chance pour la France dans une optique de développement durable, suivant les trois acceptions que recouvre cette expression : un développement écologique, économique et social. Les énergies vertes ne sont pas seulement des moyens de préserver l'environnement. Ce sont aussi des filières économiques, des ensembles industriels, des entreprises de recherche, des dizaines de milliers d'emplois potentiels. Il reste toutefois à déterminer les bonnes options stratégiques en fonction des réalités physiques et des performances technologiques. Le présent rapport a pour ambition d'éclairer la représentation nationale et, à travers elle, l'ensemble des citoyens, de l'opportunité que représente l'énergie photovoltaïque.

Il n'est pas rentable économiquement, aujourd'hui comme hier, de produire de l'électricité à partir du soleil dans le contexte d'un pays occidental à économie de marché. Ce postulat devrait toutefois évoluer devant la perspective toujours plus proche d'une taxation des émissions de carbone, face à l'engagement

des nations d'en réduire leurs parts respectives. Les prix de l'électricité sont voués à augmenter. La volatilité des cours du pétrole n'est plus à démontrer. Le doute pèse sur la sûreté des approvisionnements gaziers. Au contraire, le soleil illumine gratuitement l'ensemble de la planète et il peut être converti en électricité pour un coût que la recherche ne cesse d'abaisser. Aucune pollution ne résulte de l'opération, rien même dans la phase de fabrication des cellules qui puisse être comparé aux émissions de polluants des centrales thermiques. Aussi, quoique fort chère encore, l'énergie solaire trouve son marché.

Economiquement, le photovoltaïque a déjà commencé à concrétiser ses promesses du fait du décollage des marchés consécutif à cette rentabilité accrue. C'est le cas de l'espace français, même si d'autres – l'Allemagne, le Japon, les Etats-Unis – ont avancé beaucoup plus vite. L'hexagone comprend en 2009 une puissance installée raccordée au réseau de 140 MW. Près de 400 MW attendent leur connexion. Ce parc devrait doubler durant l'année en cours. Très réalisable, l'objectif assigné de 1 100 MW en 2012 et 5 400 MW en 2020 apparaîtrait comme significatif parmi les énergies renouvelables et au sein du bouquet énergétique national. Il est aussi prometteur en termes d'emplois. Mille cinq cents emplois directs ont été créés l'année dernière par les entreprises spécialisées adhérentes au Syndicat des énergies renouvelables, lequel représente 70 % des opérateurs. Au-delà de nos frontières, où la puissance installée s'exprime en gigawatts, ce sont des dizaines de milliers de travailleurs qui sont employés, dans les usines et dans l'artisanat, pour faire vivre le secteur. Son développement ne fait aucun doute.

	Puissance (kW)	Production (kWh)	Nombre d'installations
2004	998	561 862	295
2005	4 548	3 438 702	1 073
2006	7 154	6 752 703	1 445
2007	13 233	13 477 209	2 155
2008	48 643	35 669 978	5 209

Le photovoltaïque en France sur les cinq dernières années (périmètre EDF, source CRE)

Le photovoltaïque a enfin un impact sur le troisième volet du développement durable, sa dimension sociale. Il est fondamental que la population soit impliquée dans la lutte entreprise pour la protection de l'environnement et contre la consommation dispendieuse des ressources naturelles. Or le photovoltaïque mobilise l'ensemble des citoyens en transformant les habitations et les bâtiments collectifs, lieux de vie et de consommation d'énergie, en lieu de production d'électricité. La destination normale des panneaux solaires, c'est la toiture des particuliers. Le secteur résidentiel contribue à hauteur de 83 % des installations et de 40 % de la puissance installée selon une étude de *PriceWater*. D'après l'agence internationale de l'énergie, les toitures devraient compter pour 90 % du parc photovoltaïque à terme. Les centrales de production, bien que répondant à un schéma de distribution plus traditionnel, n'atteindraient que 10 % du total.

Cette considération est fondamentale car elle change du tout au tout la politique énergétique et la logique des réseaux publics. Les maisons individuelles, de consommatrices et destinataires du flux, deviendraient capables de générer l'électricité qu'elles consomment et, en réinjectant le surplus au bénéfice de la collectivité, elles seraient même des fournisseurs d'électricité du réseau. Si le photovoltaïque suit les projections de croissance tracées par les professionnels, ce basculement se produirait dans la décennie 2030. Il faudrait alors repenser l'architecture électrique publique. Le pourcentage d'électricité photovoltaïque dans le *mix* énergétique mondial des énergies renouvelables pourrait alors atteindre une valeur très significative et contribuer efficacement auprès de l'électricité nucléaire à gagner le combat pour une consommation raisonnée des ressources énergétiques naturelles.

Ce moment n'est pas encore venu ; les conditions de sa réalisation doivent encore être rassemblées. Il est temps, le concert des nations s'accorde à le dire, d'agir pour sauver la planète. Il est temps aussi, pour la France, de ne pas manquer une opportunité historique. On pourrait considérer qu'il suffit d'attendre que la recherche fasse son œuvre dans la diminution des coûts de production avant de multiplier les achats d'équipement et que, dans l'intervalle, le recours aux autres sources d'énergie reste préférable. Ce serait partiellement vrai : les nations étrangères développeraient une technologie que nous pourrions acquérir à moindres frais. Mais l'enjeu n'est pas seulement écologique, il est aussi économique et stratégique. Si la France souhaite se doter d'une filière performante, capable de créer de la richesse et des emplois, apte à assurer sa sécurité énergétique, à même de dynamiser son tissu industriel et de valoriser ses équipes de recherche, alors il faut agir maintenant.

Conscient que l'énergie photovoltaïque ne représente aujourd'hui et encore pour quelques années qu'une part très faible du bouquet énergétique mondial de production d'électricité et de notre bouquet énergétique national, il faut croire au développement de sa technologie. Il commence à peine. Certains partenaires économiques et concurrents commerciaux de la France ont déjà saisi les premières opportunités. Elles seraient prochainement épuisées si le pays devait se complaire dans l'inaction. L'occasion de se positionner sur le marché mondial et de s'y adjuger un rang de premier ordre reste ouverte. Le présent rapport espère convaincre les pouvoirs publics qu'il faut, absolument et sans attendre, la saisir.

CHAPITRE I : PRINCIPE ET INDUSTRIE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

L'énergie du soleil peut être employée essentiellement par trois moyens. Celui qui évoque l'énergie solaire se doit par conséquent de distinguer entre :

- La **chaleur passive** reçue du soleil qui parvient naturellement à la Terre. Cet élément est pris en compte par les bâtisseurs et les architectes depuis les débuts de la civilisation pour réduire les besoins de chauffage, notamment par le moyen d'une exposition des habitats au sud.
- Le rayonnement solaire est également employé pour son effet calorifique. On parle alors de **solaire thermique**, exploité de manière peu concentré pour du chauffage d'eau ou de bâtiment ou, sous forme très concentrée par la focalisation des rayons, pour la production d'électricité dans une centrale thermique – la vapeur actionnant les turbines provient alors d'un échange entre une source d'eau et le liquide caloporteur exposé au rayonnement concentré.

Si cette utilisation de l'énergie solaire ne fait pas l'objet du présent rapport, même si la production électrique par la concentration sera brièvement évoquée plus avant, il convient de rappeler que la technologie apparaît parfaitement mature et qu'elle s'est déjà répandue à travers le monde. Quarante millions de foyers sont ainsi équipés de capteurs solaires de chauffage domestique. L'Allemagne dispose d'un parc installé de près de dix millions de mètres carrés, soit la moitié des capacités européennes. La France peine encore à dépasser le million de mètres carrés, malgré les ambitions du plan *Face Sud* (200 000 chauffe-eau solaires en 2010) formalisé par la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique.

- Enfin, **l'énergie solaire photovoltaïque consiste en la transformation de l'énergie du soleil en électricité** propre à alimenter les différents types d'appareils électriques. Elle peut trouver des applications à l'infini ou presque en se substituant aux moyens de production classique. Il faut souligner que la production d'électricité s'opère à partir de la lumière du jour et non seulement par l'exposition au soleil.

Le présent rapport est consacré à ce dernier type d'énergie solaire qui a connu un essor remarquable depuis le début des années 2000, même si son fonctionnement demeure encore largement mystérieux pour la plupart des observateurs non avertis. Votre rapporteur a pu constater au cours de ses auditions

que des interrogations perdurent y compris parmi les milieux intéressés dès lors que l'on aborde une question relative à une phase de production ou d'installation différente du cœur de l'activité pratiquée. En outre, l'emploi d'un vocabulaire calqué sur les dénominations de la langue anglaises ne facilite pas la compréhension courante. **Premier geste symbolique d'une appropriation par la France de cette nouvelle source d'énergie, votre rapporteur se propose de n'employer dans les pages qui suivent que les traductions en français des termes techniques de la filière.**

Le sujet photovoltaïque sera d'autant mieux abordé que chacun saura parfaitement quels principes le dirigent. La production électrique à partir du rayonnement solaire s'établit sur un constat unanimement admis, celui d'un **potentiel gigantesque d'énergie naturellement à disposition de l'humanité et paré de toutes les vertus environnementales.**

Cette affirmation n'a aucunement le caractère d'une nouveauté, chacun aurait déjà pu la faire sienne il y a plus de trente ans. Mais le coût des équipements et le faible volume de production limitaient alors les applications à la conquête spatiale. Aujourd'hui, **les diverses filières technologiques parviennent à maturité**, autorisant une ouverture du marché vers le grand public à la condition d'un soutien étatique. Demain, c'est-à-dire avant 2020 en France, **la parité réseau placera le coût de l'électricité photovoltaïque au niveau du prix d'achat du marché.** La frontière de la rentabilité franchie, rien ne s'opposera plus à ce que le soleil devienne un élément majeur, voire l'élément principal, du bouquet énergétique de la France et de l'Europe.

Il reste à accompagner et à préparer une évolution que votre rapporteur juge d'ores et déjà **inéluctable**. Les équipements photovoltaïques se déclinent en deux grandes familles. Il peut s'agir de quelques cellules juxtaposées et **intégrées à un bâtiment** : aucune construction spécifique ni aucune emprise foncière ne sont alors nécessaire pour l'édification d'un réseau de production répartie, chacun devenant à la fois producteur et consommateur d'électricité. La transformation peut également se faire au sein d'un site particulièrement dédié à cette activité, centrale électrique d'un nouveau genre qui reçoit le nom de **ferme solaire** ou de **parc solaire**.

I.— LE POTENTIEL ÉNERGÉTIQUE DU SOLEIL, UNE RICHESSE INÉPUISABLE

La libération du monde de sa dépendance énergétique envers les hydrocarbures et les énergies fossiles s'impose désormais aux yeux de tous comme l'impérieuse nécessité du XXI^e siècle. L'heure n'est plus à s'interroger sur la réalité des phénomènes de changement climatique ou sur le degré de fiabilité des estimations de réserves pétrolières mondiales. C'est d'autant plus vrai que la vertu environnementale se double d'un objectif stratégique, la sécurité énergétique assurée par des approvisionnements sûrs et variés. L'Europe l'a bien compris, qui subordonne toutes les variables de sa politique énergétique à celle-ci dans le cadre

de sa *Seconde analyse stratégique pour une politique énergétique européenne*. Les enjeux ne manqueront pas d'augmenter à mesure que les pays du sud progresseront sur le chemin du développement : gardons en mémoire qu'un tiers de la population mondiale seulement dispose pour l'heure d'un accès à l'électricité.

La prise de conscience de l'obligation d'agir s'est opérée à tous les niveaux de décision. A l'échelle planétaire, le **sommet de Rio** de 1992 et le **protocole de Kyoto** de 1998 ont posé les bases d'une action commune qui appelle à se voir poursuivie dans quelques mois à **Copenhague**. Pour ce qui concerne l'Union européenne, l'accord sur le **plan climat** de décembre 2008 a vu l'assignation de l'objectif dit du *Triple Vingt*. En 2020, les pays européens devront donc avoir réduit leurs émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport au niveau de 1990, les énergies renouvelables devront représenter 20 % des énergies utilisées dans l'Union et les Etats membres devront avoir réalisé 20 % d'économie d'énergie. Enfin, notre Parlement trace lui aussi une vision ambitieuse pour la France à travers les deux lois de mise en œuvre du **Grenelle de l'environnement**, la première votée en seconde lecture en juin 2009, la seconde qui devrait être présentée à l'automne 2009 et dont votre rapporteur espère qu'elle se nourrira des présents travaux.

Dans cette **double optique de sécurisation des approvisionnements et de respect des ressources naturelles**, les énergies renouvelables au sens large bénéficient d'une attention particulière de la part des citoyens, des organes de presse et des pouvoirs politiques. Parmi elles, l'énergie solaire en général – et l'électricité d'origine solaire en particulier – réunissent un ensemble de qualités objectives qu'on ne peut manquer de considérer. Voici la description contenue dans la brochure destinée au grand public qu'édite l'association européenne de l'industrie photovoltaïque (*European Photovoltaic Industry Association, EPIA*) :

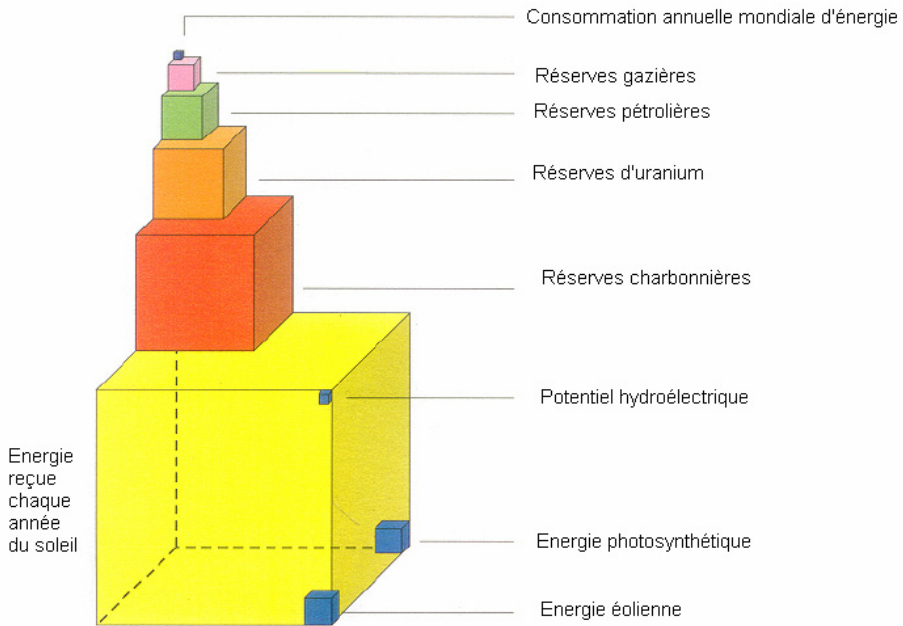
Dix raisons qui plaident en faveur de l'électricité solaire photovoltaïque

1. **Son carburant est gratuit.** Le soleil est la seule ressource dont a besoin un panneau solaire. Et le soleil brillera jusqu'à la fin des temps. De plus, la plupart des cellules photovoltaïques sont fabriquées à base de silicium, un matériau abondant et non toxique (second matériau le plus abondant sur Terre).
2. **L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.**
La combustion de ressources naturelles pour fabriquer de l'énergie engendre de la fumée, provoque des pluies acides, pollue l'eau et l'air. Cela génère aussi du dioxyde de carbone (CO₂), l'un des principaux gaz à effet de serre. L'électricité solaire utilise seulement l'énergie du soleil comme carburant. Elle ne crée aucun co-produit nocif et contribue activement à réduire le réchauffement climatique.
3. Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.
L'espérance de vie d'un module solaire est d'environ 30 ans. La performance des cellules photovoltaïques est généralement garantie par

les fabricants pour une durée de 20 à 25 ans. Au-delà, la puissance d'une cellule reste néanmoins supérieure à 80 % de la puissance initiale. Le photovoltaïque est donc une technologie fiable sur le long terme. De plus, la fiabilité des produits est garantie aux consommateurs par des standards de qualité très élevés au niveau européen.

4. **Les modules photovoltaïques sont recyclables et les matériaux utilisés pour leur production (silicium, verre, aluminium, etc.) peuvent être réutilisés.** Le recyclage n'est pas seulement bénéfique pour l'environnement, il contribue également à réduire l'énergie nécessaire pour produire ces matériaux et ainsi à réduire leur coût de fabrication.
5. L'énergie solaire photovoltaïque exige **peu de maintenance**. Les modules solaires ne nécessitent pratiquement aucune maintenance et sont faciles à installer.
6. L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux **zones rurales les plus isolées**. Les systèmes photovoltaïques apportent une valeur ajoutée aux zones rurales (en particulier dans les **pays en développement où il n'y a pas de réseau électrique** disponible). L'éclairage domestique, les systèmes de réfrigération des hôpitaux et le pompage de l'eau font partie des nombreuses applications possibles des systèmes non connectés au réseau. Les systèmes de télécommunications en zones isolées utilisent également des panneaux solaires.
7. **L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.** Les modules solaires peuvent couvrir toits et façades, contribuant ainsi à l'autonomie énergétique des bâtiments. Ils sont silencieux et peuvent être intégrés de manière très esthétique. Les législations européennes sur les bâtiments sont en cours de révision afin d'intégrer des impératifs d'énergies renouvelables pour les édifices publics et les logements. Celles-ci permettent d'accélérer le développement des éco-bâtiments et des bâtiments à énergie positive et ouvrent la voie vers une meilleure intégration des systèmes photovoltaïques dans le bâti.
8. Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment. Cela signifie que **le temps mis par un module photovoltaïque pour générer autant d'énergie qu'il en a fallu pour le produire est très court ; il varie entre 1,5 et 3 ans**. Sur sa durée de vie, un module produit donc entre 6 et 18 fois plus d'énergie qu'il n'en faut pour le fabriquer
9. L'énergie solaire photovoltaïque permet la **création de milliers d'emplois**. Avec une croissance annuelle moyenne de 40 % ces dernières années, le secteur photovoltaïque contribue de plus en plus à la création de milliers d'emplois en Europe et dans le monde.
10. L'énergie solaire photovoltaïque contribue à améliorer la **sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Europe**. Pour répondre à 100 % de la demande européenne en électricité, il suffirait de recouvrir 2 % de la superficie totale de l'Europe de panneaux solaires. Le photovoltaïque peut donc jouer un rôle important dans l'amélioration de la sécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Europe.

Quoique parfois évidents (quelle industrie ne génère pas quelques milliers d'emplois ?) ou parcellaires (si la durée de vie des panneaux photovoltaïques se compte en décennies, celle des onduleurs et des systèmes électroniques qui les accompagnent restent bien en deçà), ces arguments séduisent forcément. **L'énergie solaire captée par la terre pendant une heure pourrait suffire à la consommation mondiale pendant une année.** Au total, ce rayonnement représente 1.6 milliards de TWh, soit huit mille fois la consommation énergétique annuelle mondiale, dont 30 % sont directement réfléchis, 45 % réémis en rayonnement thermique vers l'espace et 25 % sont convertis sous différentes formes.



La maîtrise de l'énergie solaire semble aujourd'hui un **pari à la portée de l'humanité**, pour assurer un développement **non polluant** et qui ne subit pas de fortes inégalités de dotations naturelles. Sa nature intermittente la rend toutefois tributaire de **technologies annexes**, notamment dans le domaine du stockage.

I.1.— LA MAÎTRISE DE LA SOURCE SOLAIRE, UN DÉFI A RELEVER

Les avantages de l'énergie solaire ne sont plus à démontrer. Elle est **inépuisable**, ou tout du moins le moment de son épuisement dépasse encore de beaucoup les perspectives de l'humanité. Elle n'engendre **aucune pollution d'aucune ressource naturelle que ce soit**. En termes économiques, elle est

gratuite et réunit tous les caractères d'un **bien collectif** ⁽¹⁾ ce qui la déconnecte des variations des cours des matières premières. **Les coûts de production sont donc essentiellement des coûts fixes**, peu dépendants des quantités produites, au contraire des centrales thermiques utilisant des énergies fossiles, dans lesquelles les coûts marginaux représentent l'essentiel des sommes engagées.

Toutefois, l'enthousiasme spontanément ressenti doit être pondéré. D'abord, il n'est possible d'employer qu'une part restreinte du flux primaire, les phénomènes physiques et atmosphériques éloignant de la main de l'homme la totalité du rayonnement. Ensuite, si la captation de l'énergie solaire sous forme de chaleur passive ne requiert effectivement aucune infrastructure, la conversion thermique ou photovoltaïque conduit à **l'utilisation d'équipements dont la fabrication peut impliquer une consommation d'énergie carbonée.**

Ces inconvénients ne remettent pas en cause le **crédit dont jouit l'énergie solaire dans la population**, image favorable qui trouve sa source dans les années 1970 et dans les restrictions imposées à la suite du premier choc pétrolier. Il semble même à votre rapporteur qu'aucune énergie renouvelable ne puisse rivaliser au regard de ce **critère d'acceptabilité sociale**, l'éolien pâtissant de son atteinte aux paysages, l'hydraulique de son impact sur les écosystèmes et de ses capacités forcément limitées.

Néanmoins, deux spécificités de l'énergie solaire freinent encore son développement sur l'ensemble de la planète. D'abord, en dépit de l'aspect colossal des chiffres énoncés ci-dessus, le rayonnement connaît une dilution sur l'ensemble de la surface du globe, si bien que la quantité d'énergie reçue par mètre carré demeure limitée. Ensuite, et ce n'est là qu'une vérité de La Palisse, **le propre du soleil consiste bien à ne briller que le jour** – plus ou moins fort suivant les nuages et les latitudes – et à disparaître durant la nuit ; or c'est bien avec le soir que les températures chutent et que les besoins de chauffage sont les plus grands.

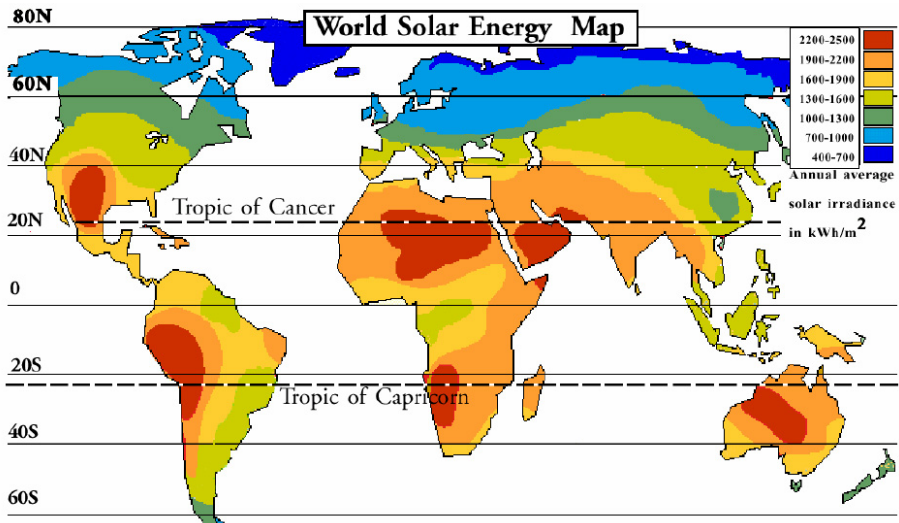
Il en découle plusieurs défis pour les ingénieurs comme pour les responsables politiques. Pour répondre à l'ensemble des besoins, les installations doivent couvrir une surface bien supérieure à celles des centrales nucléaires et fossiles dont les citoyens sont familiers, dans le cas contraire leur **participation au bouquet énergétique** restera symbolique. De plus, les panneaux solaires ne peuvent fonctionner en espace clos. L'exposition au soleil suppose **l'exposition au vent, à la pluie, à la grêle**, éventuellement à des dégradations perpétrées par un tiers. Enfin, pour permettre l'activité humaine de longue date déconnectée du rythme des astres, l'électricité d'origine solaire doit être disponible en l'absence de soleil, que ce soit par des mécanismes de **stockage** ou par une **connexion en réseau** à même de lisser les sauts de production et de consommation.

(1) *Un bien collectif est en économie un bien qui, une fois créé, est accessible à tous sans condition. Il cumule les particularités de non-rivalité, non excluabilité et indivisibilité. Nul ne peut être privé du rayonnement solaire ni se le voir facturé ni en être privé par l'usage qu'en fait autrui.*

C'est l'aspect le plus curieux de l'énergie solaire. **Gratuite dans son principe et dans son accès, elle exige le développement de technologies et de systèmes complexes et onéreux avant d'être réellement utilisable.** En fonction de la puissance du rayonnement reçu, ces coûts outrepassent la valeur de la production et condamnent l'ensemble du système, non rentable. Ce fut le cas jusqu'à la fin du XXe siècle, et ça l'est encore dans les zones les plus septentrionales. Ainsi, même les dirigeants des firmes majeures du marché photovoltaïque considèrent qu'il n'est pas opportun que des nations comme le Royaume-Uni s'investissent dans la production d'énergie d'origine solaire, faute de matière première, alors que d'autres sources renouvelables parviendront plus rapidement à atteindre le seuil de rentabilité.

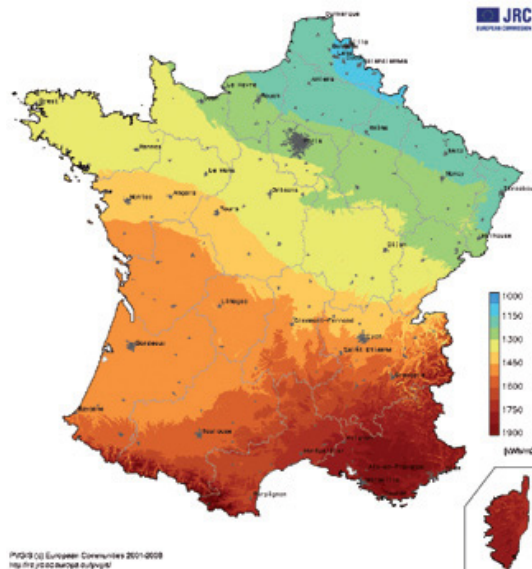
I.2.— UNE ÉNERGIE PARTOUT PRÉSENTE MAIS INÉGALEMENT REPARTIE

L'énergie que rayonne le soleil en direction de la Terre est maximale à une latitude **équatoriale**, puis elle décroît à mesure que les pôles approchent et que les nuages se font plus nombreux. Dans une perspective **limitée aux régions peuplées par l'homme, elle ne varie pourtant que dans un facteur de 1 à 3,5.** Les régions septentrionales du Canada et de la Scandinavie reçoivent environ un total de 700 kWh chaque année, alors que les régions les plus sèches d'Afrique du Nord atteignent les 2 500 kWh par an. En Europe, l'Andalousie et l'Extrême Adour sont les zones les mieux loties, avec 2 200 kWh annuels.



Parmi les Etats du Vieux Continent, **la France est la plus concernée par ces variations d'exposition** en ce qu'elle s'étend de la mer du Nord, proche des latitudes les moins dotées, à la mer Méditerranée, particulièrement propice à l'installation de capacités de production d'énergie de source solaire. On estime l'énergie reçue à Lille à 1 000 kWh par an, soit près de deux fois moins que Nice (1 900 kWh annuels), ce qui renchérit l'installation sur une résidence particulière

de 70 %. Cette **dichotomie de l'espace national** n'est à l'heure actuelle pas prise en compte par la puissance publique dans l'édiction de sa politique de soutien à l'énergie solaire, mais elle interpelle forcément l'observateur dans la mesure où une moitié de la France bénéficie de conditions d'ensoleillement très comparables à l'Espagne et l'autre moitié d'une situation voisine de celle des territoires allemands. Des péréquations pour un meilleur aménagement de l'espace français seront pourtant obligatoires si l'on veut éviter un manque d'implication des populations du nord dans la question énergétique d'une part, une saturation des résidents du sud devant la spécialisation subie de leur cadre de vie et la multiplication des installations visibles d'autre part.



ÉNERGIE solaire reçue en France sur un plan tourné vers le sud avec inclinaison optimale.

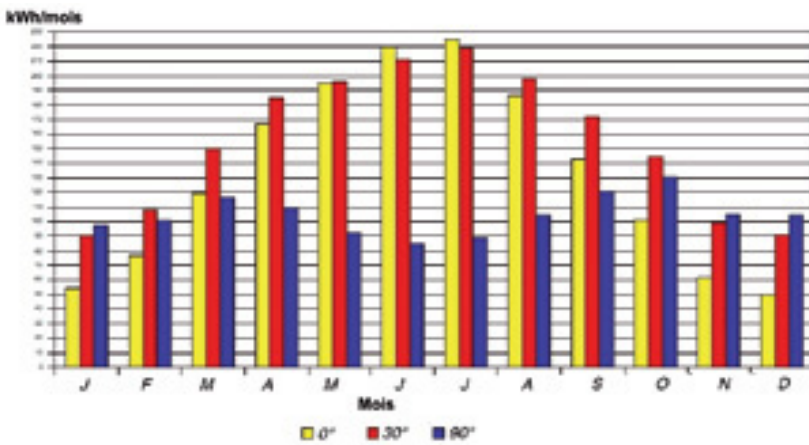
L'énergie solaire reçue par mètre carré **se compose à la fois du rayonnement solaire direct et de la lumière reçue indirectement** par diffusion dans l'atmosphère et réflexion par les nuages. La part de cette dernière varie en fonction de l'ensoleillement entre 10 % du total reçu, dans les régions méridionales à ciel clair, et 60 % dans les climats tempérés. Cette distinction est primordiale car elle conditionne le choix de la technologie solaire la mieux adaptée. Alors qu'un concentrateur convertit le meilleur du rayonnement direct, un capteur plan produit de l'énergie même dans des conditions d'ensoleillement voilé.

Enfin, il faut indiquer que la sagesse humaine peut conduire à maximiser l'apport d'un ensoleillement pourtant limité. Un capteur vertical en façade sud aura ainsi une production hivernale plus élevée qu'un capteur incliné même si sa production annuelle est plus faible, ce qui peut se révéler un **calcul astucieux** dans les zones aux hivers rigoureux et aux étés doux. De même, votre rapporteur a appris que les **installations photovoltaïques californiennes** se trouvaient

orientées non pas de sorte que leur production globale soit maximale mais afin de maximiser la quantité d'électricité produite aux heures où la population consomme le plus, apportant ainsi un **surcroît d'offre en période de crête**.

I.3.— UNE ÉNERGIE PAR NATURE INTERMITTENTE QUI NÉCESSITE DES CAPACITÉS DE STOCKAGE

L'inégalité de répartition de l'énergie solaire n'est pas seulement spatiale, elle revêt aussi un **caractère temporel**. Le rythme circadien induit un minimum de trois cent soixante-cinq périodes de production tout au long de l'année, en réalité bien plus du fait des passages nuageux qui altèrent le rayonnement direct et modifient le rayonnement diffus. Quant à la succession des saisons, son influence varie également en fonction des latitudes : elle sera faible à proximité de l'Équateur, maximale à l'intérieur des cercles polaires.



Énergie reçue par mois à Toulon sur un capteur à différentes inclinaisons, orienté plein sud : en jaune, capteur horizontal production annuelle de 1 600 kWh/m²/an, minimum en hiver 50 kWh/m²/mois ; en rouge, capteur incliné à 30° sur l'horizontal, production maximale de 1 865 kWh/m²/an ; en bleu, capteur vertical production de 1 250 kWh/m²/an, minimum en hiver 100 kWh/m²/mois. La position verticale donne la plus grande production l'hiver au prix d'une perte annuelle conséquente.

Deux grandes méthodes sont envisageables pour parer cette alternance de production d'énergie liée à la course du soleil. La première consiste en une **mise en réseau** capable de moduler les apports à la faveur des différences d'ensoleillement des lieux de production, et surtout de combler les périodes creuses par le recours à des équipements alternatifs. C'est la voie actuellement privilégiée dans la majorité des pays industrialisés, mais elle suppose l'existence d'un réseau déjà performant et de compétences avérées dans l'équilibrage de l'offre et de la demande.

Une autre voie à explorer repose sur le **stockage** de la production quotidienne et sur son déstockage au cours de la nuit. Diverses technologies ont été mises au point :

- Particulièrement adaptée aux habitats isolés et aux populations insulaires privées d'une connexion à un réseau majeur, l'utilisation d'accumulateurs électrochimiques permet de conserver l'électricité produite directement. C'est aussi la technologie la plus ancienne, l'énergie solaire apparaissant sans concurrent dès lors que les coûts de raccordement au réseau sont inexistants.
- La conservation de la chaleur par un fluide caloporteur est mise en œuvre dans les centrales électriques utilisant les principes thermodynamiques.
- Le stockage peut enfin prendre la forme de la conversion de l'énergie produite en une autre forme. Des pompes solaires accumulent des quantités d'eau dans un réservoir de surface. Un chauffe-eau solaire conserve pour sa part l'eau à bonne température dans un cumulus.

Ces quelques considérations laissent penser que le soleil constitue la meilleure chance de développement pour l'humanité. Propre, partout présent, facilement accessible, le rayonnement solaire n'a pourtant été converti en électricité pendant longtemps que dans un **cénacle très restreint, celui des spécialistes de la conquête spatiale**. Son coût faramineux rendait en effet chimérique toute velléité d'élargissement du marché à l'équipement des consommateurs courants, et les quelques prototypes de concentrateurs des années 1980 dans la région d'Odeillo (Pyrénées-orientales) furent rapidement abandonnés.

Depuis, les sauts technologiques successifs et les rapides abaissements de coût ont changé la donne. Les filières technologiques sont arrivées à **maturité** et la recherche ne cesse de progresser pour repousser sans cesse la double frontière du secteur, le taux de rendement des cellules et les frais de leur conception.



II.— L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE, UNE TECHNOLOGIE EN ÉVOLUTION

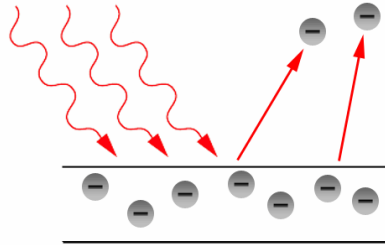
Avant de préciser les techniques employées et les coûts qu'elles représentent, il semble utile de présenter brièvement le **principe de l'énergie photovoltaïque** en mentionnant les mécanismes physiques qu'elle met en œuvre. Cet exposé trouve toute sa place dans un rapport relatif à la filière photovoltaïque française : **c'est en effet à un membre de la communauté scientifique française que revient l'honneur d'avoir pour la première fois mis en évidence un effet photoélectrique.**

Assisté de son fils Alexandre, le polytechnicien **Antoine BECQUEREL** (ci-contre) – le grand-père du découvreur de la radioactivité – observe en 1839 le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière. Prolongée dans la seconde moitié du XIX^e siècle par les études de HERTZ – on parle d'ailleurs parfois de **l'effet Hertz** pour désigner l'énergie photovoltaïque, cette observation a permis la théorisation des *quanta de lumière* par **Albert EINSTEIN** en 1905. Ceux-ci, absorbés lors de l'interaction d'un matériau avec le rayonnement solaire, seraient responsables du mouvement d'électrons. L'analyse corroborée par les recherches postérieures valut à EINSTEIN le Prix **Nobel** de physique en 1921. Nous connaissons aujourd'hui ces particules sous le nom de **photons**.

II.1.— LA THÉORIE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

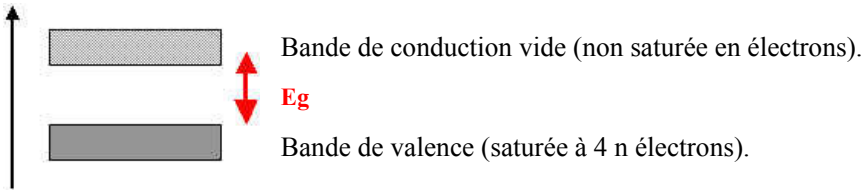
L'effet photoélectrique désigne le phénomène par lequel des électrons se trouvent libérés d'un matériau à la suite d'une exposition à une radiation électromagnétique comme, par exemple, la lumière solaire ou des rayons X.

L'effet ne peut être expliqué par la physique de Newton et la conception ondulatoire classique de la lumière, pourtant validée par les lois de l'optique. Elles conduisaient en effet à considérer qu'une augmentation de l'intensité lumineuse et du temps d'exposition devaient suffire à transférer suffisamment d'énergie pour précipiter la libération des électrons. Or les observations expérimentales ont prouvé que la variation de l'intensité lumineuse seule n'expliquait pas seule la production d'électrons et qu'une modification de fréquence produisait également son effet.



Il faut utiliser un **semi-conducteur**, matériau dont la concentration en charges libres est à mi-chemin entre l'isolant et le conducteur : les électrons de valence ne peuvent circuler que si on leur fournit **l'énergie nécessaire** (*Eg* dit *energy gap*) pour **se délier du noyau de l'atome**. Le plus connu et le plus utilisé est le silicium.

Pour des atomes à quatre électrons de valence comme le silicium, on a deux ensembles de niveaux d'énergie très proches les uns des autres qui forment deux bandes que l'on appelle la bande de valence et la bande de conduction.



E_g est l'écart entre les deux bandes. Si E_g n'est pas trop grand et si un photon est absorbé par le matériau, un électron peut « sauter » la bande d'énergie E_g et peupler la bande de conduction. Afin de recueillir un courant électrique il est nécessaire d'introduire un champ électrique de part et d'autre de la cellule. Pour cela, un processus de « dopage » est mis en place.

La couche exposée à la lumière subit un **dopage** de type « n ». On introduit dans le semi-conducteur des impuretés tel du **phosphore** qui possède cinq électrons dans sa couche périphérique, soit un de plus que le silicium. La concentration en charge libre dans les cellules de type « n » est donc augmentée. A l'inverse la face arrière est constituée de cellules dopées « p » à l'aide de **bore** en règle générale. Le bore ne possède que trois électrons sur sa couche périphérique, créant ainsi un « trou » (défaut d'électron) supplémentaire.

Lorsque l'on met en présence deux cellules de type « n » et « p » et après recombinaison des charges libres (électrons et « trous ») un **champ électrique constant s'instaure**. Ainsi, lorsque les photons heurtent les électrons avec une énergie supérieure à E_g les électrons libérés peuvent se mouvoir sous l'action du champ électrique engendré par le dopage ce qui provoque l'apparition du courant électrique. Les charges déplacées sont alors collectées par une grille sur la face avant et une plaque métallique de contact sur la face arrière. Elles se déplacent dans le circuit ainsi fermé.

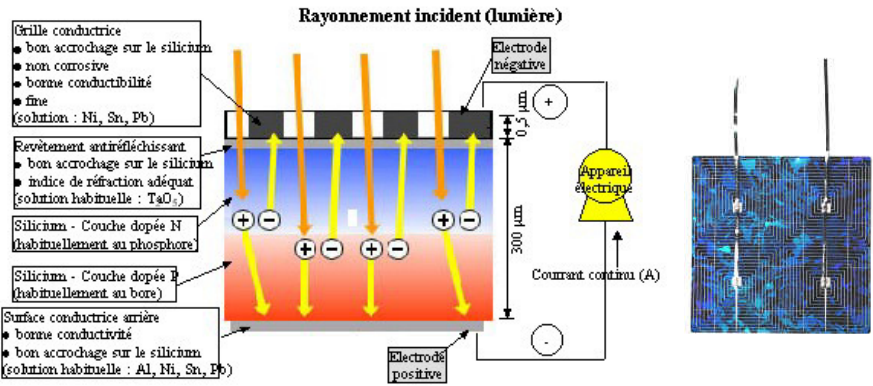


Schéma de description d'une cellule photovoltaïque

Cellule photovoltaïque polycristalline

Pratiquement, la **cellule photovoltaïque** est composée de **plusieurs couches minces** :

- une couche « **anti-reflet** » sur la face avant dont le but est de faciliter au maximum la pénétration d'un maximum de photons à travers la surface et de réduire les pertes par réflexion ;
- une **grille conductrice avant** « collectrice des électrons » qui doit également être liée au silicium et ne pas être sensible à la corrosion ;
- une couche dopée N avec **porteurs de charges libres négatifs** (électrons) ;
- une couche dopée P avec **porteurs de charges positifs** (trous) ;
- une **surface de contact conductrice en métal** « collectrice des électrons » ayant une bonne conductivité ainsi qu'un bon accrochage sur le silicium.

Une alternative au dopage du semi-conducteur pour lequel on parle d'**homojonction** consiste en l'utilisation de deux semi-conducteurs différents, on parlera alors d'**hétérojonction**. Il est également possible d'empiler les jonctions afin d'exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons (**cellules multi-jonctions**).

Les cellules photovoltaïques et les panneaux solaires utilisent l'effet photoélectrique pour générer directement de l'**énergie électrique à partir de la lumière du soleil**. Le terme photovoltaïque vient du grec *phos, photos* qui désigne la lumière et de « *voltaïque* », mot dérivé du physicien italien VOLTA connu pour ses travaux sur l'électricité.

Le rendement d'une jonction est limité par le choix du semi-conducteur puisque les photons d'énergie inférieure à la bande interdite (écart entre la bande de valence et la bande de conduction) ne permettent pas de libérer un électron et que **seuls les photons très énergétiques sont par conséquent utilisés**. Le rendement maximum théorique de conversion, rapport de l'énergie électrique produite et l'énergie lumineuse reçue, excède les 30 %. **En pratique, malgré les travaux entamés dès le XIXe siècle, il a fallu attendre les années 1950 pour obtenir un taux de conversion supérieur à 6 %.**

II.2.— LES MATERIAUX DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Il existe **divers matériaux à même de mettre en œuvre l'effet de conversion photovoltaïque**. Chacun d'entre eux est susceptible de donner naissance à une filière industrielle et, en fonction des progrès de la recherche, de s'imposer sur tous les autres. Votre rapporteur ne se risquera pas à désigner celle qui aurait la faveur des pronostics, les plus grands industriels du secteur hésitant eux-mêmes sur la méthode la plus rentable et la plus prometteuse à terme.

Les méthodes de production photovoltaïque se répartissent en familles en fonction de la technologie employée. Chacune possède ses avantages et ses

inconvenients, et on se gardera bien d'une focalisation excessive sur la question des rendements. Ceux-ci sont d'ailleurs toujours entendus en **Wc (puissance crête)**, c'est-à-dire dans des conditions d'exploitation **optimales** et rarement réalisées d'éclairement de mille watts par mètre carré, de température de 25 °C et d'air masse de 1,5 (soit le spectre de la lumière solaire après avoir traversé une épaisseur d'air correspondant à 1,5 fois l'épaisseur de l'atmosphère).

D'autres critères doivent entrer en compte : les coûts économiques de production naturellement, mais également le coût environnemental et social et les risques induits sur la santé humaine, l'emprise foncière nécessaire, l'adaptabilité à des conditions d'ensoleillement plus ou moins favorables, la prise au vent dans la perspective d'une intégration sur des toitures, la souplesse du matériau, la couleur plus ou moins naturelle et esthétiquement acceptable du produit final, etc.

On sépare traditionnellement les technologies existantes en trois grandes familles, ou plutôt en **trois générations**. Le **silicium cristallin** constitue la filière historique, la plus répandue à l'heure actuelle et celle dont les produits sont le mieux identifiés. Plus récemment sont apparues les technologies de **couches minces**, plus fines comme leur nom l'indique, et dont la part de marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules **polymères photovoltaïques** seront mentionnées pour information dans la mesure où leurs performances ne peuvent encore être observées que dans des conditions expérimentales et qu'elles ne constituent qu'une alternative à long terme. On fera également cas des **concentrateurs** destinés aux centrales, destinés à suivre la course solaire et à exposer en permanence des cellules extrêmement onéreuses et à très fort rendement.

A. La filière historique : le silicium cristallin

La production de modules photovoltaïques s'est traditionnellement opérée à partir de **silicium (Si)**, ce qui explique que cette filière représente encore l'essentiel de la production d'équipements solaires, soit 80 % à 90 % du marché.

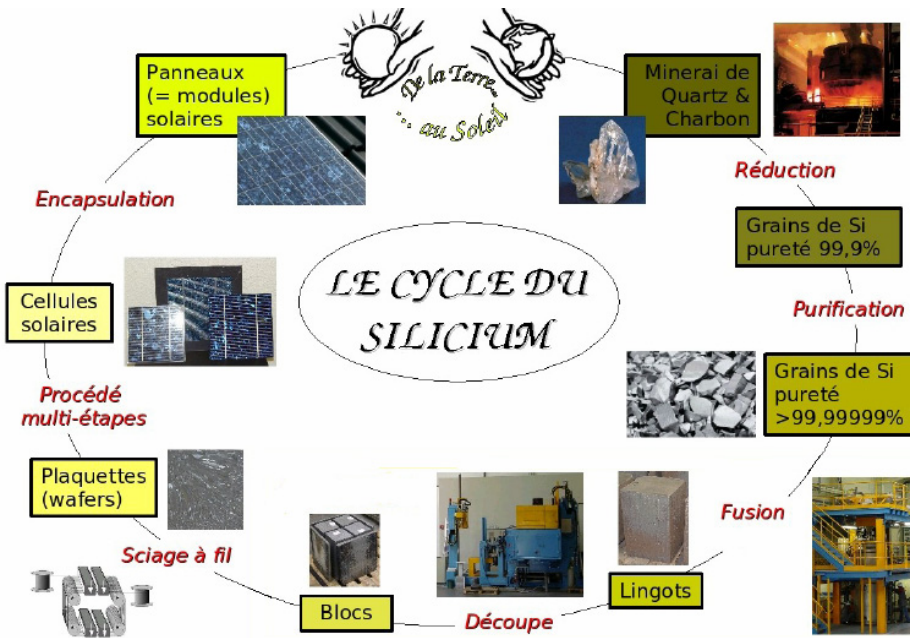
a) Le silicium : usage, avantages et inconvénients

On produit le silicium par réduction à partir de **silice**, notamment à partir du sable et du quartz. Il est utilisé de longue date dans la conception du verre et il tient un rôle important dans les nouvelles technologies, notamment dans les appareils électroniques ainsi que, bien sûr, dans les applications photovoltaïques.

Même s'il n'existe pas à l'état libre dans la nature, la question de sa disponibilité ne se pose pas. C'est en effet après l'oxygène l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre, représentant plus du quart de sa masse. Sa production à destination de l'industrie solaire apparaît cependant relativement coûteuse car elle exige un **matériau purifié à l'extrême** (plus de 99,99 %). Il convient dans un premier temps de réaliser un silicium dit de **qualité métallurgique**, pur à 98 %, obtenu à partir de galets recelant du quartz – le sable n'est jamais employé par l'industrie. Une seconde étape permet d'accéder au

silicium de **qualité photovoltaïque** par la conversion mentionnée ci-dessus. Longtemps l'industrie s'est satisfaite des rebuts de la production électronique, plus exigeante encore (pureté requise de 99,9999 %).

L'insertion dans le cycle industriel s'opère sous la forme de **lingots** de silicium, de section parfois ronde et plus fréquemment carrée, eux-mêmes débités en **blocs** pour un transport facilité. La phase suivante consiste à scier les blocs en fines plaques de 0,1 à 0,4 millimètre d'épaisseur. La dénomination communément admise les désigne comme des *wafers*, votre rapporteur privilégiera le terme plus compréhensible de **plaquettes**.



Ces plaquettes sont ensuite traitées de façon à réaliser l'effet photoélectrique précédemment décrit grâce à des éléments tels que le phosphore, l'arsenic, l'antimoine ou le bore. Une grille conductrice est apposée à l'avant pour relier l'ensemble à des contacts électriques. Une couche antireflets déposée à l'avant complète la fabrication de la **cellule photovoltaïque**. Il ne reste alors plus qu'à connecter les cellules entre elles dans l'ordonnancement souhaité pour obtenir la puissance et la tension souhaitée, et à encapsuler le tout dans un vitrage étanche pour obtenir le produit final, le **module photovoltaïque**.

La production des équipements photovoltaïques nécessite de l'énergie. Votre rapporteur a déterminé au cours de ses auditions qu'un module photovoltaïque doit fonctionner entre une et trois années pour que sa production électrique équilibre la quantité d'énergie qui a été nécessaire à sa propre fabrication. C'est le **temps de retour énergétique du module**, qui a souvent été avancé comme argument pour déqualifier le caractère propre et renouvelable de

l'énergie photovoltaïque. Il ne peut être retenu désormais, les systèmes conçus jouissant d'une durée de vie normalement supérieure à vingt ans et affichant par conséquent un bilan énergétique largement positif.

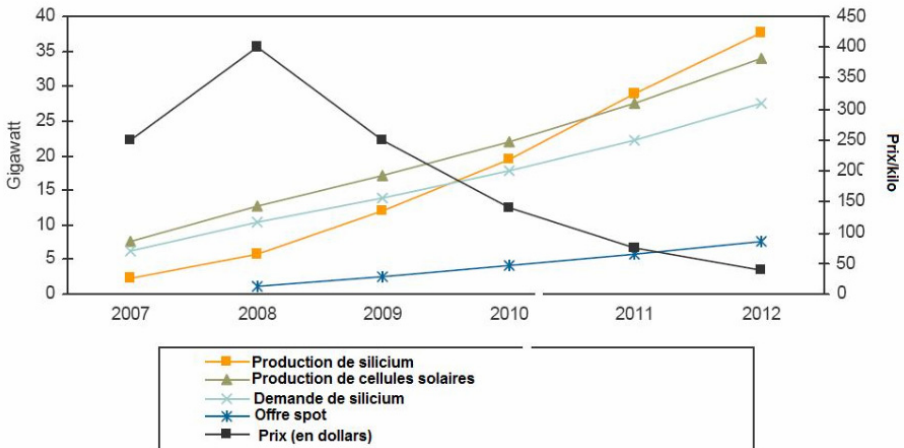
Deux caractéristiques déterminantes de la filière du silicium doivent être mentionnées à ce stade, l'une de nature physique, l'autre économique. Les **qualités optoélectroniques du matériau** se révèlent médiocres en ce que sa structure de bandes électroniques se traduit par une grande longueur d'absorption. La réception du spectre solaire nécessite par conséquent une épaisseur de silicium d'une centaine de microns. Cette longueur semble infime à un œil non averti, mais elle est importante en termes électroniques car elle laisse **un temps conséquent aux électrons et aux trous pour se recombiner** pendant leur trajet respectif entre les pôles. Pour éviter des pertes rédhibitoires, on l'a dit, la qualité du cristal comme la pureté du matériau employé se doivent d'être irréprochables. Or le débitage des blocs en plaquettes génère obligatoirement des **rebuts importants**, accroissant sensiblement les **coûts de production**. Des techniques innovantes de production, que votre rapporteur a pu observer en France, limitent heureusement cette faille structurelle de la filière.

L'autre caractéristique de la filière tient à sa **dépendance** envers la matière première qu'elle requiert, le **silicium**, qui représente entre le tiers et la moitié du coût total d'une cellule. Quoique celui-ci abonde dans la nature, la rapide croissance de l'industrie photovoltaïque a créé une demande que les faibles capacités de l'offre mondiale, jusqu'alors assise sur la récupération des déchets laissés pour compte par l'industrie électronique, laquelle utilise un silicium plus purifié encore, ne pouvaient satisfaire. **Le modèle économique est de fait devenu caduc** lorsque la production photovoltaïque a mobilisé trente mille tonnes de silicium par an, soit plus que l'industrie électronique elle-même. Cet excès de demande a généré deux effets contraires.

- D'une part, des **spéculateurs** se sont emparés du marché, multipliant les effets de la pénurie – laquelle trouvait déjà une source conjoncturelle dans l'explosion sans lendemain des productions espagnoles. Alors que le **kilogramme de silicium** s'échangeait à quelques dollars au début des années 2000, il a dépassé en novembre 2008 les **400 dollars**. Des activités de recherche ont été lancées en réaction pour réduire la masse de silicium nécessaire à la conception d'une cellule, réduisant l'épaisseur des plaquettes entre cent et deux cents microns.
- D'autre part, cette hausse des prix a rendu le marché attractif pour de nouveaux industriels, **inaugurant une filière de silicium solaire** distincte du monde de l'électronique. Une soixantaine de producteurs de silicium solaire ont surgi ces deux dernières années, essentiellement en Chine, alors que jusque-là sept entreprises concentraient 90 % de la production mondiale (Hemlock, Wacker, REC, Tokuyama, MEMC, Mitsubishi et Sumitomo). Succédant à la

pénurie qui régnait, **l'offre de silicium sera excédentaire vers 2010** et permettra aux fabricants de cellules de davantage négocier leurs coûts : la production double en 2009 alors que la demande augmente seulement du tiers.

D'autres ont entamé une **transition technologique** vers l'utilisation d'un **silicium de qualité métallurgique**, pour aboutir à des résultats légèrement moins performants que compensent des coûts réduits. Votre rapporteur l'a observé en France sur le site de l'usine Photowatt.

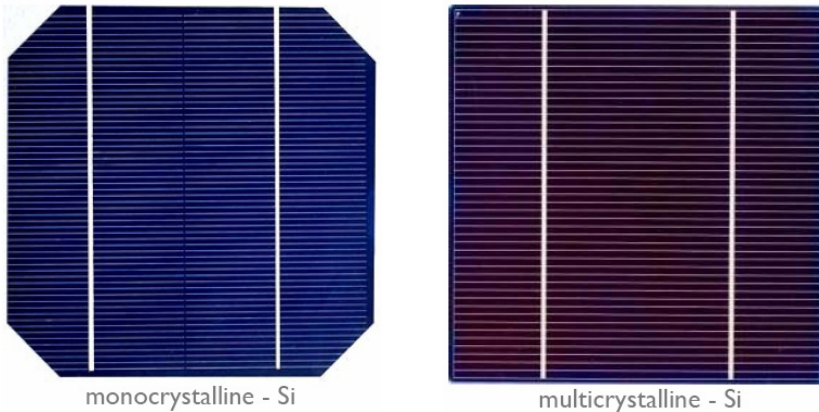


b) Le silicium monocristallin

Une première technologie permet, lors de la phase de refroidissement du silicium fondu, de le solidifier en formant un **crystal unique** de dimension importante et d'une **très grande pureté**. Celui-ci est ensuite découpé en plaquettes converties en cellules, d'un bleu électrique et reconnaissables à leurs bords coupés pour une meilleure intégration au module.

Le silicium monocristallin a l'avantage des **meilleures performances en termes de rendement sous un éclairage direct**, de l'ordre de 15 à 16 %. Il nécessite donc une **emprise plus restreinte** que d'autres technologies à production égale, ce qui le favorise pour les installations dans un espace limité.

En revanche, le silicium monocristallin pêche par son **coût de production élevé**. Il pâtit également de performances **réduites** dès lors que les conditions d'ensoleillement se dégradent.



c) Le silicium multicristallin

Contrairement au précédent, le procédé technologique provoque pendant le refroidissement consécutif à la fusion, la formation de **plusieurs cristaux de silicium**. La cellule photovoltaïque produite par cette filière se singularise par un aspect bleu électrique non uniforme, laissant apercevoir les motifs créés par les divers cristaux la composant.

Le silicium multicristallin présente un **rendement** de conversion **légèrement moindre** que le monocristallin, mais qui reste néanmoins attractif. Son **coût de fabrication s'avère surtout moins important**, avantage renforcé par une durée de vie moyenne dépassant les trente ans.

Il s'avère moins performant dans de mauvaises conditions d'ensoleillement.

B. La filière innovante : les couches minces

Les inconvénients physiques du silicium cristallin ont encouragé l'orientation de la recherche vers la découverte de matériaux de substitution. Elle a particulièrement privilégié les **couches minces**, c'est-à-dire le **dépôt sur un substrat** de matériaux semi-conducteurs. L'opération de dépôt elle-même constitue un véritable enjeu technologique et plusieurs méthodes plus ou moins avancées coexistent à l'heure actuelle : l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, l'électrodépôt ou encore la sérigraphie. L'avenir proche dira sans doute quelle technique porte les meilleures perspectives de développement. Toutefois, les applications possibles suscitent un fort intérêt : libérées de la contrainte d'épaisseur qui frappe le silicium cristallin, les couches minces pourraient s'adapter à un grand nombre d'objets de la vie quotidienne dans le cadre d'équipements bivalents.

Parmi l'ensemble des matériaux envisagés, la plupart ont révélé un **excès de défauts cristallins** rendant impossible leur transformation en cellules photovoltaïques. **Trois filières** semblent finalement en passe de s'imposer. La première utilise des formes modifiées du **silicium**, formes amorphe ou polycristalline. La seconde met en œuvre le **tellure de cadmium**. La troisième enfin procède à des combinaisons à partir de l'**indium**. Toutes appellent l'emploi de surfaces de verre qui représentent une part non négligeable du coût final, mais celui-ci demeure suffisamment bas pour poursuivre le développement malgré des performances moindres.

a) Les couches minces de silicium

La combinaison du silicium et d'hydrogène a permis la découverte d'un matériau à la fois semi-conducteur et désordonné, le **silicium amorphe**, doué de faibles qualités électroniques mais d'excellentes propriétés optiques. En effet, en dépit d'une mobilité des électrons en son sein bien plus faible que dans le silicium cristallin, une épaisseur inférieure au micron suffit à absorber le spectre solaire. De plus, son procédé de fabrication plasma permet de le déposer sur des supports très variés, y compris sur des polymères **flexibles**, ouvrant ainsi la voie à **quantité d'applications industrielles** – la cellule, de couleur grise, se retrouve fréquemment intégrée dans des calculatrices solaires par exemple. La filière a cependant durement été frappée lorsqu'il s'est avéré que le silicium amorphe voyait son rendement décroître à mesure de son utilisation et **n'atteignait donc plus les performances promises** au moment de la vente. Il semble toutefois que cette baisse d'efficacité ne soit pas permanente et qu'une **stabilisation** se produise à terme.

Le silicium amorphe présente des **rendements faibles** en plein soleil, de l'ordre de 8 %, qui s'érodent à environ 7 % au cours des premières années. Une production photovoltaïque significative réclame par conséquent des surfaces importantes. Un coût de revient avantageux, une fabrication peu énergivore et une performance accrue dans des conditions d'éclairage faible ou diffus peuvent compenser ces défauts et désigner cette technologie pour **l'équipement des régions les plus nuageuses**.

Il est également envisageable de **marier la technologie du silicium amorphe avec les cellules traditionnelles** afin de réunir leurs qualités et de minimiser leurs handicaps. En effet, l'amorphe absorbe correctement la couleur bleue et forme une multijonction efficace avec les performances du cristallin sur le rouge. On pourrait ainsi approcher les 20 % de rendement, pour un coût néanmoins bien plus élevé que celui d'une cellule classique. L'association de silicium amorphe et de silicium micromorphe dans des couches minces dites **tandem** poursuit la même logique, comme les **cellules triple jonction** à très haut rendement.

	Rendement		Coût
	<i>Laboratoire</i>	<i>Industrie</i>	
Silicium monocristallin	25 %	16 %	+++
Silicium multicristallin	20 %	14 %	++
Silicium amorphe	13 %	8 %	+

b) Le tellure de cadmium (CdTe)

Le tellure de cadmium affiche un **rendement légèrement supérieur** à celui du silicium amorphe (10 %) mais toujours bien en deçà des cellules traditionnelles. Cette voie technologique bénéficie d'un avantage notable en ce qu'elle est **facile à synthétiser** et que ses coûts s'avèrent tout à fait abordables. L'entreprise américaine *First Solar* se trouve en **quasi monopole** sur la filière, produisant 500 MW en 2008 et comptant parmi les acteurs majeurs du marché photovoltaïque toutes technologies confondues.

Le matériau souffre pourtant de **handicaps importants**. D'abord, les chercheurs ne sont pas parvenus à élever son **rendement en laboratoire**, qui plafonne depuis 2001 aux alentours de 16 %. Il est probable que les **capacités de conversion théoriques** soient **bien plus limitées** que pour le silicium et les autres types de couches minces.

Ensuite, contrairement au silicium, le tellure apparaît comme un composant dont la **rareté** est à même d'entraver le développement commercial du produit. Il est ainsi moins répandu que des métaux précieux comme le platine. Dans l'état technologique actuel, un gigawatt de modules photovoltaïques en tellure de cadmium nécessiterait plus de soixante tonnes de tellure ; or la production mondiale annuelle est de l'ordre de deux cent cinquante tonnes. Ce dernier chiffre doit être il est vrai considéré avec **circonspection** car le produit n'est pas collecté pour lui-même mais comme résidu de traitement du plomb et du cuivre. D'autre part, on a identifié de riches gisements sous-marins et spatiaux dont on ne sait cependant s'ils seront ou non exploitables à brève échéance.

Enfin, la filière pâtit de son recours au **cadmium**, un élément qui n'existe pas sur Terre à l'état natif, mais dont la **toxicité sous toutes les formes** est identifiée depuis les années 1950. Il compte même parmi les six produits faisant l'objet de **restrictions d'usage aux termes de la directive 2002/95/CE dite ROHS**, bien que son composé utilisé dans la production d'énergie solaire n'y soit pas mentionné. On a identifié le cadmium comme source de fièvres, d'atteintes rénales et pulmonaires, ou encore de cancer du poumon. Il n'est pas absorbé par la peau et **son voisinage sous forme solide ne provoque par conséquent aucun**

dommage ; sa vaporisation pourrait au contraire aboutir à des empoisonnements par inhalation. Pour des raisons de sécurité, le CdTe ne figure pas sur le marché du photovoltaïque à destination des particuliers. Il est plus **employé par les fermes solaires**, surveillées et préservées des risques d'incendie. Ayant assuré que les plaques de verre empêchent de toutes façons la libération du métal hors des cellules, *First Solar* s'est engagé à **recycler** ses modules en fin de vie afin de prévenir tout danger de diffusion du cadmium dans le milieu naturel. Cet engagement, s'il doit être salué, suppose néanmoins pour l'entreprise une **pérennité** que nul n'est en mesure d'assurer aujourd'hui.

c) Le di-séléniure de cuivre-indium (CIS)

Les cellules élaborées à partir de cuivre, d'indium et de sélénium devraient en bonne chimie être désignées sous le sigle CuInSe_2 . En pratique, le monde photovoltaïque a retenu le terme plus concis de **CIS** pour nommer ces couches minces qui semblent les plus prometteuses en l'état actuel de la technologie. Sa bande interdite faisant défaut, on lui allie souvent du gallium (Ga) pour optimiser ses qualités et accroître la tension disponible, de sorte qu'on rencontre parfois également l'abréviation **CIGS**.

Cette technologie atteint un **rendement proche de 13 %** et elle détient de bonnes perspectives d'avenir avec des réalisations de 20 % en laboratoire. Sa flexibilité néanmoins reste encore à améliorer. Une hétérojonction s'impose pour permettre le mouvement électronique, généralement à partir de sulfure de cadmium ou, pour éviter ce dernier, d'oxyde de zinc. Moins performante que le silicium traditionnel, cette technologie présente toutefois un **prix deux fois moindre**. Des sauts technologiques à venir devraient améliorer encore ce rapport qualité/prix. Enfin, une autre qualité remarquable dans une approche globale est contenue dans les tentatives mises en œuvre pour **teinter** les cellules de couleurs spécifiques, ce qui pourrait permettre une meilleure insertion dans les paysages et une plus grande acceptabilité sociale.

La filière se heurte cependant à un écueil similaire à la précédente, à savoir la **rareté de l'indium**, dont la quantité sur Terre équivaut seulement au triple de celle de l'argent. Les chercheurs interrogés par votre rapporteur ont cependant apporté des **réponses particulièrement rassurantes** à cette inquiétude. Il apparaît en premier lieu que l'indium ne fait pas l'objet de forages spécifiques et qu'il est recueilli lors du raffinage du minerai de zinc ; c'est ainsi que la production annuelle d'argent se monte au triple de celle de l'indium pourtant lui-même trois fois plus présent dans la nature. En second lieu, la substituabilité d'un autre matériau ne semble pas poser problème, du moins théoriquement, et même les projections de ressources les plus pessimistes devraient permettre à la recherche d'accéder à la mise en pratique sans difficultés excessives.

La dépendance de la filière à l'indium pourrait également faire craindre à plus court terme des **fluctuations de marché** comparables à celle qu'a connues le silicium dans la période récente. Mais la technologie de couches minces semble

nettement **moins exposée** du fait de la faible quantité de matériau employée dans une cellule, d'une part, et de la part importante que représente le vitrage dans le coût final, d'autre part.

C. Les filières de demain : polymères et concentrateurs

Bien que plus éloignées d'un horizon commercial voire au stade de la recherche fondamentale, les filières novatrices actuellement envisagées doivent être mentionnées dans le présent rapport.

La troisième génération de cellules photovoltaïques met en jeu des **polymères organiques voire inorganiques**. Elles reposent sur des macromolécules dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs d'énergie que ceux mis en œuvre pour les cellules traditionnelles à base de semi-conducteurs minéraux. Leur **coût de revient très faible** se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible laisse même envisager des matériaux souples en polymères organiques ou en silicones, voire des fibres textiles et des encres photovoltaïques. D'une **durée de vie fort courte**, elles n'offrent pour l'instant que des rendements de moins de 5 % en laboratoire et devront donc être **améliorées** avant de pouvoir servir de base au développement d'une filière industrielle.

A plus brève échéance, les **systèmes à concentration** se voient destinés aux centrales photovoltaïques. Installés sur des dispositifs mécaniques permettant de suivre la course du soleil et de bénéficier ainsi d'un ensoleillement maximal, ils se composent d'un dispositif optique concentrant la lumière solaire sur des cellules de tailles restreintes offrant un **rendement particulièrement élevé** tout en maintenant une température inférieure au point de fusion de la matière. Particulièrement prometteurs dans les zones à fort ensoleillement direct (car l'ensoleillement diffus ne peut faire l'objet d'une concentration), ils pourraient atteindre des performances de 50 % grâce aux qualités des **cellules multijonction**. Le coût de réalisation de ces équipements excède de beaucoup celui des cellules traditionnelles, mais la masse d'énergie produite en contrepartie suffirait à restaurer la rentabilité du système.

D. Un positionnement à déterminer

Dans une optique de développement industriel à même tout à la fois de préserver l'investissement et d'offrir un avantage économique au pays, **il revient à la France de se positionner** en tant qu'acteur mondial du marché photovoltaïque. Or si notre pays accuse un retard important dans son parc installé comme dans ses capacités de production, il pourrait être possible d'en tirer avantage en évitant de répéter les mauvais choix opérés ailleurs dans le monde.

En pratique, pourtant, opter pour une technologie plutôt que pour une autre apparaît un pari trop risqué et surtout **infondé**. Les auditions conduites par votre rapporteur ont mis en avant le caractère particulièrement éclaté du secteur et, le

plus souvent, l'impossibilité de distinguer une filière dont l'avenir serait forcément plus prometteur que celui des autres. **Tous ont concordé sur le fait que les couches minces possèdent une marge de progression importante et qu'elles capteront une part significative du marché. Mais tous ont également admis que le silicium avait pour avantage sa maturité et ses rendements sans cesse améliorés, considérant dès lors qu'il devrait maintenir sa part prépondérante dans les volumes de production et de vente à court et moyen terme. Quant aux polymères, nul ne peut prédire en l'état si les recherches les concernant s'avèreront fructueuses ou non.**

En fait, votre rapporteur retient surtout de ses investigations des **principes qu'il convient de garder à l'esprit** au moment d'aborder l'industrie photovoltaïque dans l'ambition de donner à la France une position d'excellence.

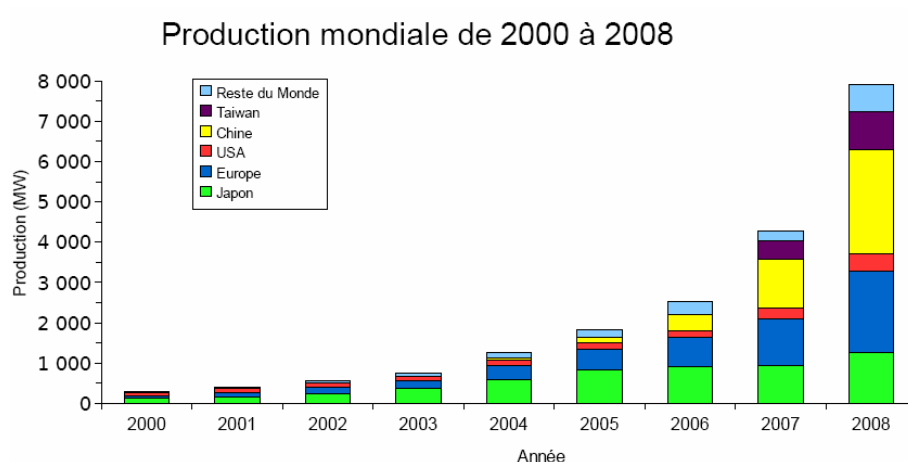
- **La recherche occupe dans ce domaine un rôle fondamental**, seule à même de permettre la construction et le maintien d'une filière performante. Les rendements toujours améliorés, les intégrations toujours parfaites, les procédés industriels sans cesse repensés font indéfectiblement reculer celui qui ne progresse pas.
- **L'approche politique** du secteur photovoltaïque doit obligatoirement être **globale** et non se focaliser sur des domaines particuliers. La question des rendements ne doit pas éclipser l'importance du bilan économique, du bilan environnemental, du bilan social de l'activité.
- Le photovoltaïque est une **industrie de la connaissance**, à ce titre **une délocalisation lui apporte des avantages limités**. Les recherches imposent un savoir technique et une communauté scientifique de haut niveau que, justement, la France peut mettre en avant. Les opérations de production industrielle impliquent une main d'œuvre très qualifiée et des équipements performants, ce qui réduit fortement la compétitivité prix des Etats aux salaires moins élevés. Enfin, la phase d'installation ne peut que difficilement être exportée au-delà des frontières, offrant une activité importante aux artisans nationaux et communautaires.
- Conformément aux principes précédents, la France ne doit pas adopter la posture d'un concessionnaire automobile mais davantage celle d'un motoriste. Il n'est pas dramatique que les innovations soient copiées et mises en œuvre ailleurs dès lors que le temps de la copie aura suffi à les rendre obsolètes. Ce principe, à rebours, suppose de rechercher par soi-même les voies à suivre et non d'opter uniquement en fonction des réussites ou des échecs d'autrui.

De fait, il convient de **ne rejeter aucune technique existante a priori**, sauf si aucune amélioration ne semble envisageable. Votre rapporteur incline seulement en défaveur du **tellurure de cadmium** qui cumule à ses yeux trop de

handicaps : danger pour la santé humaine, rareté, faible potentiel de développement et domination de marché exercé par une entreprise étrangère. Les autres branches peuvent en revanche être explorées et valorisées au cas par cas, application par application.

II.3.— UN PARC MONDIAL EN CROISSANCE EXPONENTIELLE

Sans s'être totalement banalisée, l'énergie photovoltaïque a connu un développement remarquable, au rythme de **35 % de croissance annuelle moyenne** depuis le début du XXI^e siècle. L'Allemagne représente à elle seule à la fois la grande majorité de la puissance installée et des capacités de production de l'Europe. Le Japon et la Chine constituent les autres principaux foyers du marché alors que les nouveaux entrants comme la Corée enregistrent des progressions rapides. La France, avec 100 MW installés en 2008, apparaît comme un acteur mineur du marché.

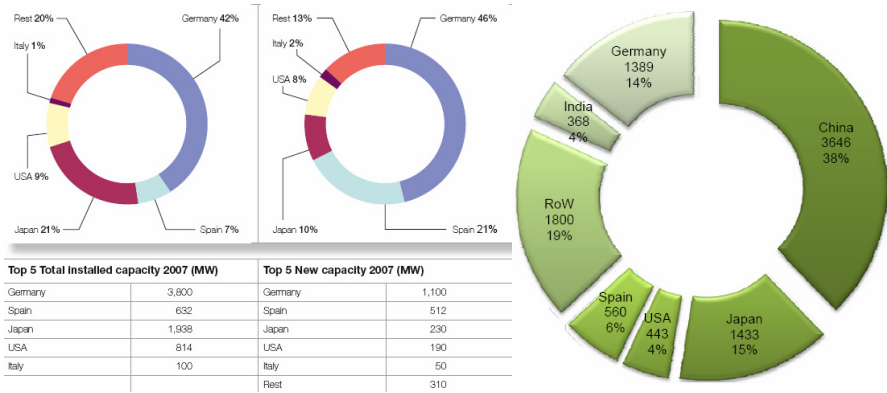


La constitution d'un parc photovoltaïque au cours des dernières années a surtout été déterminée par l'**existence d'aides significatives** concédées par la puissance publique. Ainsi, le Japon – pour des raisons tenant à sa géographie insulaire qui renchérit le coût des réseaux et à sa forte industrie électronique utilisant des technologies voisines – et l'Allemagne – profitant d'un régime d'aide d'Etat favorable concédé par l'Union européenne pour les régions de l'ancienne RDA – ont acquis des capacités considérables en un temps relativement restreint. Ces deux pays ont conservé depuis une position stratégique sur le marché mondial.

Suivant le même modèle, l'Espagne a connu en 2007 et 2008 une explosion de son secteur photovoltaïque, sans lendemain du fait d'une programmation défailante comme votre rapporteur a pu le constater à l'occasion d'un déplacement à Madrid. Cette expérience espagnole, corrélée à l'apparition de la Chine sur le marché photovoltaïque, conduit votre rapporteur à la conviction que rien n'est encore définitivement acté dans la hiérarchie mondiale de l'industrie

photovoltaïque. Il a suffi d'une année à l'Espagne pour devenir un élément déterminant du jeu mondial. Il a suffi de fort peu de temps à Pékin pour s'imposer comme une nation productrice de premier rang, alors même que le marché chinois n'existe pratiquement pas : **des positions fortes peuvent être conquises à l'international**. De plus, la situation française apparaît d'autant plus prometteuse que la géographie et le niveau de vie créent une demande en faveur de cette nouvelle énergie. **Contrairement à la Chine qui forme un pôle industriel dépourvu de marché domestique, la France constitue un marché domestique dépourvu (ou presque) de pôle industriel de production.**

Enfin, l'opportunité industrielle ne semble pas non plus refermée comme **le marché mondial demeure extrêmement fragmenté**. Aucune entreprise ne parvient à s'assurer une domination d'un dixième des échanges. Mieux encore, les parts de marché agrégées des dix plus gros industriels du secteur atteignent seulement un tiers de l'activité globale. Il reste des chances à saisir pour les nouveaux entrants, à condition que les conditions de production les placent dans les meilleures conditions de compétitivité qui soient.



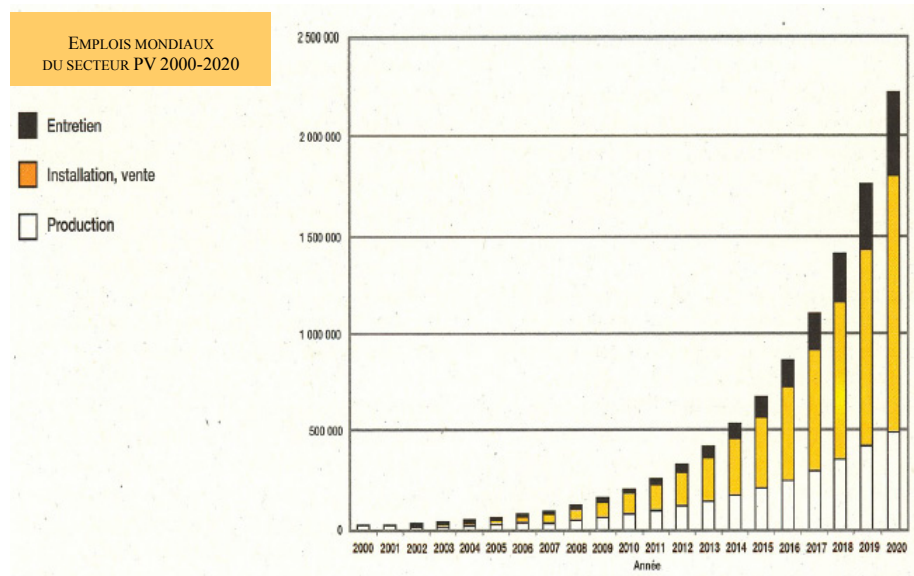
Capacité installée par pays en MW (totale et nouvelle pour 2007). Capacités de production en 2008.

		2007	2008E	2009E	2010E	2011E
1	Q-Cells	8%	7%	8%	7%	6%
2	Suntech Power	6%	6%	5%	5%	4%
3	Sharp	10%	6%	4%	4%	4%
4	Gintech	3%	3%	3%	2%	2%
5	JA Solar	3%	3%	2%	2%	2%
6	First Solar	3%	3%	4%	4%	4%
7	SunPower	2%	2%	2%	2%	2%
8	Motech	3%	2%	2%	2%	2%
9	Yingli Green Energy	2%	2%	2%	2%	2%
10	Solarfun	3%	2%	2%	2%	2%
	Others	57%	64%	66%	69%	69%

Le marché du photovoltaïque : une atomisticité qui permet l'insertion de nouveaux entrants.

A mesure que les technologies progressent et que la rentabilité s'accroît, la production comme la demande de photovoltaïque devraient poursuivre leur augmentation. L'accès à l'électricité des **populations du Sud**, que la France doit considérer autant comme un défi planétaire que comme un impératif dans la coopération, et la prise de conscience des **dangers du changement climatique** et du gaspillage énergétique militent tout autant en faveur d'un développement de cette énergie propre. Les projections à court terme traduisent cette orientation. De 2,5 GW en 2006, la production d'électricité d'origine solaire atteindrait pratiquement 11 GW en 2009 et plus de 22 GW en 2011.

Pour produire et faire fonctionner ces capacités de production photovoltaïque, la **compétence technique** est nécessaire et l'investissement capitaliste inévitable, mais nous savons qu'il n'est de richesse que d'hommes. Le secteur photovoltaïque, comme toute branche industrielle et commerciale, offre des **emplois en grand nombre** que le pouvoir politique ne peut négliger en cette période de crise économique. Ainsi que l'exposent les projections figurant sur le graphique suivant, plus de deux millions de personnes dans le monde devraient travailler en 2020 directement ou indirectement grâce à l'électricité solaire. L'industrie n'offrirait par ailleurs que le quart de ces emplois, les gisements les plus importants se trouvant dans l'installation et l'entretien, donc dans une **activité par nature vouée à demeurer à proximité des équipements installés**. Cette lecture achève de convaincre que la France doit jouer un rôle dans la filière photovoltaïque et que l'Etat doit s'engager en ce sens, car le marché national existe déjà et son développement futur ne fait pas de doute.



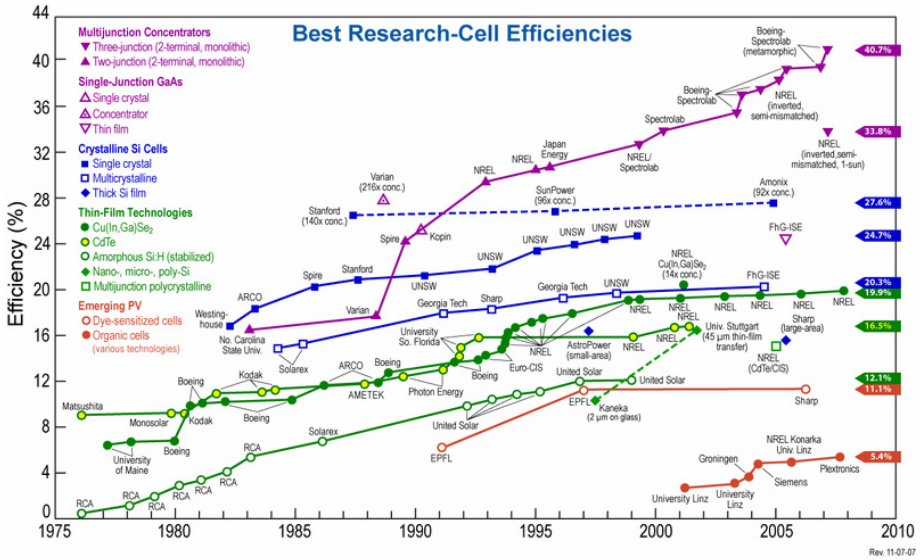
L'énergie photovoltaïque jouit donc de grandes qualités. Ses technologies, quoique toujours en développement constant, fonctionnent correctement et donnent de bons résultats. Il existe une demande forte pour de nouvelles

installations et les capacités de production semblent se multiplier. Un unique caractère fait encore défaut pour que les acteurs économiques seuls organisent et développent le marché, comme il justifie et légitime d'ailleurs l'action de la puissance publique. **Jusqu'à présent, l'électricité solaire n'a aucun potentiel dans un système marchand car elle est incapable de fonctionner de façon rentable. Cette dernière hypothèse – certes d'importance – sera levée dans les dix années à venir. Il faudra, alors, que le marché français soit prêt.**

II.4.— UNE ÉNERGIE BIENTOT ECONOMIQUEMENT RENTABLE : LA MARCHE VERS LA PARITE RESEAU

Si ce rapport est rapidement passé sur l'histoire spatiale du photovoltaïque et sur les cellules à fort rendement construites par exemple à partir d'arséniure de gallium, c'est que ces développements ne trouvent pas d'application qui soit directement profitable au grand public en raison de leur coût prohibitif. Le photovoltaïque coûte cher, plus cher que toutes les autres énergies disponibles, qu'elles soient fossiles ou renouvelables. Si ce constat revêtait un caractère irrémédiable, il serait superflu de poursuivre le propos : **un bien excessivement onéreux et substituable par d'autres n'aurait aucun avenir**, sauf à ce que l'externalité environnementale influe fortement sur le coût économique, situation qu'il vaut mieux ne pas souhaiter tant elle implique une dégradation des conditions de vie sur le globe terrestre.

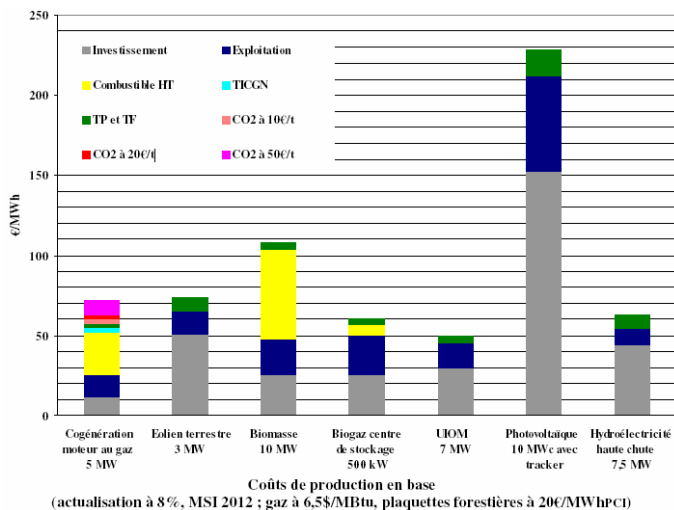
La cherté de l'électricité solaire n'a cependant rien d'irrémédiable. Bien au contraire, elle devrait sous peu devenir l'une des plus facilement accessible qui soit. Dans l'histoire du secteur, les **ruptures technologiques successives** tendent soit à augmenter les rendements à coût constant, soit à diminuer les coûts à rendement constant. On sait, justement, que les performances des différentes technologies se sont perpétuellement améliorées depuis BECQUEREL et que rien n'indique que ce mouvement touche à sa fin, comme l'indique l'historique ci-dessous récapitulant la constante progression des rendements depuis trente ans.



Source : National renewable energy laboratory

Quant à la diminution des sommes nécessaires à la production d'une cellule photovoltaïque, le secteur connaît une **loi d'apprentissage**, historiquement validée et admise par toutes les personnes auditionnées, selon laquelle **le doublement de la production induit un gain de l'ordre de 20 % sur le coût total des cellules**. Rien ne permet de supposer qu'elle soit remise en cause dans un avenir proche, et les perspectives du marché mondial indiquent une croissance exponentielle. Or, dans la filière silicium du moins, la cellule photovoltaïque compte pour la majorité du coût du système.

Il reste qu'en 2009 le solaire photovoltaïque nécessite un soutien public pour se développer. De toutes les énergies renouvelables, **le kWh photovoltaïque est actuellement de loin le plus dispendieux**.



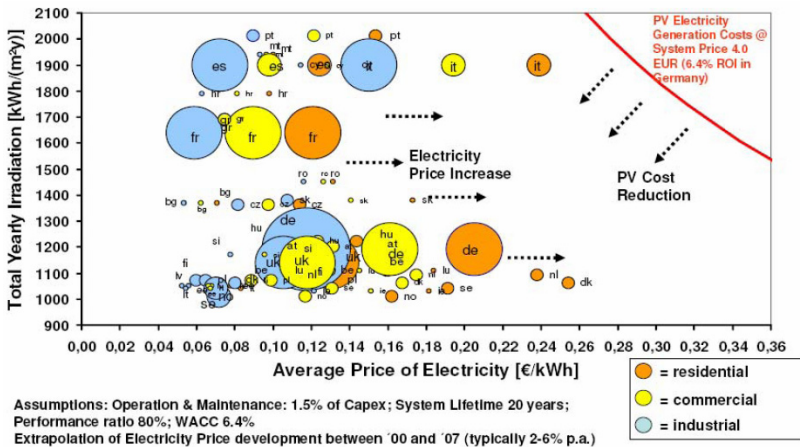
Source : Synthèse publique de l'étude des coûts de référence de la production électrique 2008, MEEDAT

Cette situation devrait s'inverser à court terme pour des pays comme l'Italie et les Etats-Unis, à moyen terme pour la France d'après les scénarii de développement dressés par les spécialistes de la filière. Le calcul du prix futur d'une énergie requiert de poser des hypothèses en matière de prix des matières premières, de taux d'intérêt, de frais de maintenance, de durée de vie des installations, etc. Ces hypothèses ont pu varier à la marge suivant les interlocuteurs rencontrés par votre rapporteur, mais sans incidence sur la conclusion tirée par tous. Les prix du photovoltaïque devraient atteindre ce que le secteur nomme la *grid parity* et qui sera désigné dans la suite de ce rapport sous le terme de *parité réseau*.

Le point de parité réseau correspond au moment auquel l'électricité photovoltaïque est disponible à un coût inférieur ou égal à l'électricité disponible à travers les réseaux de distribution. **Ce n'est donc pas une référence absolue**, mais une frontière variable en fonction des caractéristiques de production et de distribution de la zone concernée. **D'ores et déjà la parité réseau est atteinte dans les régions fortement ensoleillées** où l'électricité se négocie à un prix élevé, comme la Californie, **ainsi que dans les îles et archipels** dans lesquels la connexion à des centrales continentales apparaît délicate (Japon, Hawaii). Elle devrait progressivement gagner l'ensemble de l'Europe entre 2010 et 2020 sur la base des postulats suivants, que votre rapporteur partage :

- Le photovoltaïque n'est pas soumis aux **fluctuations de marché** comme le gaz, le pétrole, voire l'uranium. Sa source d'énergie est inépuisable est toujours disponible, au contraire des précédentes dont la tendance lourde est au renchérissement ;

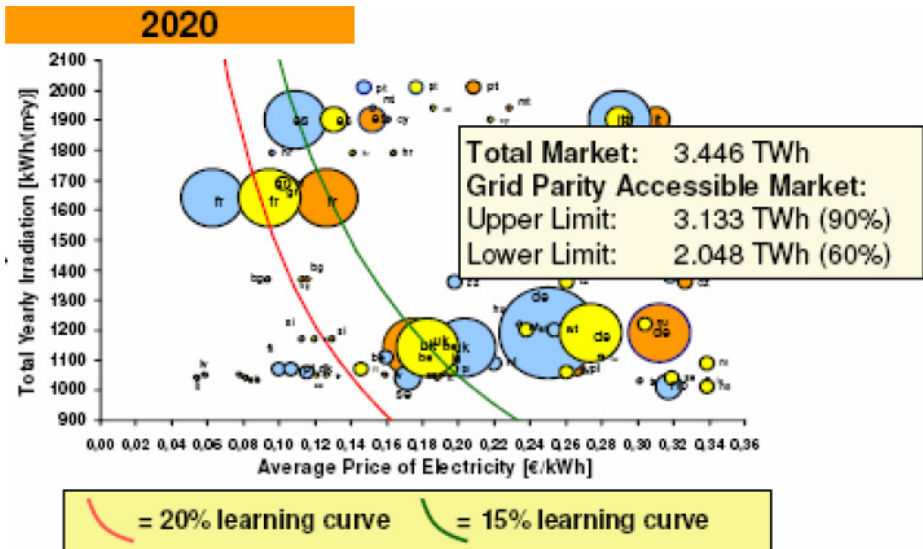
- La **nécessité d’agir contre le changement climatique** en général et les émissions de gaz à effet de serre en particulier devrait conduire à des **taxes** de plus en plus élevées sur les centrales fossiles ;
- La **maintenance** des installations photovoltaïques ne réclame qu’un **contrôle limité**, contrairement aux installations classiques et nucléaires ;
- Alors que les prix de l’électricité traditionnelle devraient donc logiquement augmenter, les économies d’échelle induites par le décollage du marché photovoltaïque et les sauts technologiques attendus devraient symétriquement faire **décroître** ceux des cellules solaires ;
- Le développement des couches minces et l’apparition à plus long terme des cellules polymères de troisième génération permettront la **conception d’équipements polyvalents**, assurant une fonction en plus de la production d’énergie (brise-soleil, toitures, peintures, sols, etc.) ;
- Le photovoltaïque bénéficie en outre d’un avantage comparatif dans sa forme répartie, intégrée aux toitures individuelles : il permet **l’économie des coûts de distribution et de commercialisation**, relativement importants puisqu’ils justifient la différence entre le coût de production (soit quatre centimes avec une centrale nucléaire ou un cycle combiné de gaz) et le prix de vente à la population (de l’ordre de douze centimes en France métropolitaine aujourd’hui).



L’association européenne des industriels photovoltaïques – **EPIA** – a réalisé une projection pour les différents Etats du continent et pour les secteurs résidentiel, commercial et industriel. Le premier graphique ci-dessus indique la situation en 2008, avec le prix moyen de l’électricité réseau en abscisses et le rayonnement solaire reçu en ordonnées. La courbe rouge, dans le coin supérieur

droit, formalise le coût de production du kilowattheure photovoltaïque. Celui-ci n'est **jamais rentable pour l'heure**.

Le second graphique, ci-dessous, correspond à une **projection pour l'année 2020**. La courbe rouge indique le coût de production du kilowattheure photovoltaïque dans le respect de la courbe d'apprentissage historique du secteur (soit 20 %) ; la courbe verte retient une hypothèse un peu moins optimiste de 15 %. Les bulles représentant les tarifs du réseau se sont déplacées vers la droite, traduisant une augmentation des coûts sur le rythme des premières années du siècle.



Ces données interpellent sur le **cas particulier de la France**, qui sera le **dernier des grands pays européens à atteindre la parité réseau**, bien après des nations bien moins ensoleillées comme l'Allemagne, le Royaume-Uni et le Danemark. La France bénéficie en fait des **dividendes de ses investissements en faveur d'une diversification de son bouquet énergétique** et plus particulièrement de son engagement nucléaire. Déjà en 2008, le prix de réseau de l'électricité française apparaît inférieur à la quasi-totalité de celui de ses partenaires, s'échelonnant entre quatre et quatorze centimes le kilowattheure pour les marchés industriel et résidentiel. Dans les projections pour 2020, leur **niveau est demeuré stable** car la production française ne devrait que modérément subir la hausse des coûts retenue en hypothèse. **Au contraire, les autres pays pâtissent d'une augmentation importante** : les tarifs résidentiels italien et allemand augmentent ainsi de près de dix centimes.

Ce paradoxe apparent rappelle que **la parité réseau n'est pas un seuil absolu** que tous franchiront au même instant, il sera donc difficile de la localiser dans le temps à l'échelle mondiale. L'Italie, pays fortement ensoleillé et aux prix

de l'énergie élevés, devrait l'atteindre dès 2012, quand la Grèce, pourtant tout aussi ensoleillée, n'y parviendra qu'après 2015 du fait de ses tarifs modérés.

La France attendra par conséquent plus longtemps que les autres que son marché devienne rentable et que les acteurs économiques y trouvent leur intérêt en l'absence d'incitation étatique. Elle aura donc un **décal supplémentaire pour se structurer et pour délivrer un cadre stratégique clair** aux opérateurs. Les productions photovoltaïques ne sont en effet pas univoques, elles peuvent revêtir les habits de la grande industrie à travers des centrales couvrant des hectares comme ceux du père de famille installant quelques mètres carrés de modules solaires sur sa toiture.

III.— LE PHOTOVOLTAÏQUE, UNE SOURCE D'ÉNERGIE MULTIFORME

L'image de l'énergie solaire dans le grand public est partiellement fautive, nourrie d'une expérience révolue et d'une globale ignorance des évolutions du secteur. Elle s'est construite sur l'habitude – plus ou moins répandue suivant les régions – d'apercevoir des panneaux solaires sur les toits des habitations. Il est vrai que les éclats de lumière bleutée marquent les esprits et tranchent relativement avec le noir des ardoises du nord de la Loire, plus encore avec le rouge des tuiles de la France méridionale.

Ce ressenti, donc, ne devrait plus avoir cours tant il repose sur des **impressions surannées** voire inexactes. Les panneaux qui ornent les toits depuis plusieurs années n'ont plus la même fonction. Ils étaient jadis dévolus soit au chauffage de l'eau par mise à profit de l'effet thermique du soleil, soit à l'électrification des zones très isolées dépourvues de connexion aux réseaux de distribution selon le principe de l'autoconsommation. Les modules d'aujourd'hui équipent très majoritairement des **habitats déjà fournis en énergie électrique par un approvisionnement extérieur**. Ils ne fonctionnent pas sur le principe de l'autoconsommation, mais dans le but de **réinjecter l'électricité produite sur le réseau** contre un paiement garanti par une réglementation publique, légale ou réglementaire suivant les Etats. Il revient ensuite au gestionnaire de réseau d'agrèger les productions reversées et de **moduler en conséquence l'apport restant que fournissent les centrales classiques pour équilibrer offre et demande** sur l'ensemble de la chaîne. Pour votre rapporteur, il s'agit bien ici du schéma directeur qui prévaudra à moyen et à long terme.

Plus étonnant pour le grand public car confidentiel jusqu'à une date récente, la maturité de la technologie permet l'édification de véritables **centrales de production photovoltaïques**. Là encore, il faut se défaire des images héritées, des années 80, des gigantesques fours solaires par concentration de Mont-Louis et Odeillo. Les parcs solaires actuels correspondent plutôt à des champs de panneaux à perte de vue, de plus ou moins grande envergure suivant le relief, l'ensoleillement et la capacité de production. Ces installations, qui engagent la grande industrie là où le modèle de développement sur toitures privilégie

l'implication des particuliers, apparaissent à la fois nécessaires et porteuses de dangers à prévenir. **L'action de l'Etat n'en est que plus essentielle.**

Enfin, entre la centrale de conversion de masse et l'investissement individuel des foyers particuliers, un dernier champ de production requiert un regard particulier. S'il n'est ni le plus prometteur ni le plus innovant, sans doute est-ce lui qui porte à court terme les meilleures potentialités d'économie d'énergie et de production d'une électricité totalement propre. Les **grandes toitures** désignent ces espaces plans des bâtiments non résidentiels – commerces, usines, installations agricoles, etc. – qui pourraient sans grands travaux être équipés de technologies photovoltaïques. Leur intérêt majeur réside dans les **vastes surfaces inutilisées et disponibles** sans qu'une adjonction n'entraîne une détérioration esthétique, permettant ainsi l'emploi de matériaux éprouvés et peu coûteux comme le silicium amorphe, dont le rendement limité se trouve compensé par une multiplication de l'aire de captation du rayonnement solaire.

III.1.— LES FERMES SOLAIRES, DES CENTRALES ÉLECTRIQUES D'UN TYPE NOUVEAU

Les unités massives de production photovoltaïque sont qualifiées de **centrales**, de **fermes** ou encore de **parcs**. Elles prennent la forme d'alignements de panneaux solaires étagés sur plusieurs hectares, avec d'éventuels systèmes complémentaires mobiles (traqueurs) pour une meilleure captation du rayonnement.

La recherche de la rentabilité conduit les opérateurs à retenir pour leurs parcs solaires les **technologies les moins onéreuses**, le coût foncier supplémentaire ne remettant pas en cause l'économie réalisée. Ce sont donc des modules de couches minces qui sont le plus souvent employés. Il a en revanche été délicat d'identifier le ratio moyen entre la surface nécessaire et la puissance installée, les estimations des professionnels auditionnées oscillant **entre un et trois hectares par mégawatt crête**.

Votre rapporteur a tenu à observer *de visu* le fonctionnement et les éventuels effets négatifs de telles installations. Il s'est donc rendu en avril sur le site de la plus grande unité solaire de l'hexagone, exploitée dans le département de l'Aude depuis 2008 par EDF Energies Nouvelles. Installée sur un terrain de 23 hectares mis à disposition par la ville de Narbonne, elle déploie 80 000 m² de panneaux solaires pour une puissance de sept mégawatts, soit la **consommation annuelle de près de cinq mille habitants**. Ces modules en tellurure de cadmium sont légèrement surélevés et inclinés de façon à présenter un meilleur angle d'ensoleillement ; une légère séparation entre les différentes rangées évite une déperdition de capacité que causerait l'ombre des installations les unes sur les autres. Pour ces raisons, **votre rapporteur retient la valeur de un mégawatt pour trois hectares comme clef de conversion entre puissance installée et surface requise**.

Il ne sera pas question d'évoquer ici les installations les plus imposantes au monde. Les records de puissance et de financement sont battus pratiquement toutes les semaines dans des communiqués de presse, pour plusieurs dizaines de mégawatts et jusqu'à une centaine de millions d'euros. Il reste cependant à voir si ces projets chinois, américains, australiens ou encore canadiens survivront à la crise pour sortir effectivement de terre. En France, la prochaine ferme prévue devrait atteindre 8,8 MW pour 36 millions d'euros, dans le département de Charente-Maritime à l'horizon 2010.

En réalité, **votre rapporteur estime que les enjeux des fermes solaires se situent ailleurs. S'il semble opportun et nécessaire d'y recourir afin de structurer au mieux la filière française, il ne semble pas qu'elles soient l'avenir dans une nation française réputée pour la beauté de ses paysages et finalement peu à même de libérer pour la production d'électricité des milliers d'hectares inoccupés dans les zones ensoleillées du sud du territoire.**

A. Des avantages incontournables

Une ferme solaire n'est jamais que l'alignement sur des structures relativement légères de panneaux photovoltaïques orientés vers le soleil. Elle ne fait entrer en jeu aucune substance polluante ou radioactive – à l'exception éventuelle d'un cadmium toujours gardé sous surveillance et inoffensif en l'état. Son fonctionnement n'exige que des bâtiments de contrôle relativement exigus. Quant aux panneaux eux-mêmes, vissés ou emboîtés, ils ne sont jamais que des immeubles par destination qui peuvent promptement être retirés, déplacés ou remplacés. Ici se trouve le principal avantage des parcs photovoltaïques par rapport à une centrale plus classique, qu'elle fasse appel à une technologie nucléaire, à un combustible fossile ou même à un potentiel hydroélectrique. **Les terrains employés ne sont jamais dégradés par la pose des modules de production, leur remise à l'état initial ne requiert ni opération lourde ni traitement de déchets durables.**

Votre rapporteur a également été sensible à l'**opportunité de coupler les modules solaires à d'autres dispositifs** visant, notamment, à la dépollution de sites laissés en friche car jugés dangereux pour toute activité humaine. C'est là un second argument en faveur de la multiplication des fermes solaires. Il existe de nombreux terrains qui, pour toutes sortes de raisons, ne sont utilisables ni par l'agriculture ni par l'industrie ni a fortiori dans une optique résidentielle. C'est le cas d'anciens sites miniers, de zones situées au voisinage d'installations polluantes ou radioactives, de surfaces rendues dangereuses par la proximité d'un captage d'eau, etc. Le recours à ces terrains offre deux avantages. En premier lieu, ils permettent d'**éviter un conflit d'usage avec des activités plus traditionnelles**, qui ne manquerait pas de générer une **hostilité importante** de la part des populations riveraines et des autorités locales. En second lieu, donc, ils laissent entrevoir un **double bénéfice pour la collectivité** : les terres polluées, immobilisées et rentabilisées par l'exploitation d'équipements photovoltaïques, laissent à disposition vingt à trente ans pour mener en parallèle une action

profonde de dépollution et de reconversion. On peut notamment imaginer la disposition de plantes au pied des installations de façon à exfiltrer des composés toxiques. Le photovoltaïque aurait alors un **impact positif**. Votre rapporteur a également recueilli l'idée séduisante d'employer les terrains de sécurité de part et d'autres des autoroutes pour l'installation de panneaux solaires ; il est vrai que ces surfaces n'ont pour l'heure pas grande utilité et qu'elles présentent de surcroît l'avantage de se trouver sur le tracé routier, donc à proximité immédiate des réseaux électriques et de simplifier d'éventuels raccordements. Il reste certes à évaluer la faisabilité technique d'une telle suggestion, mais elle démontre tout le **potentiel de production laissé à portée de main si la France parvient à allier inventivité et développement durable**.

Les fermes solaires offrent un dernier avantage plus fondamental encore. Parce qu'elles constituent par nature des projets uniques, elles bénéficient pour chacune d'entre elles du **concours d'équipes scientifiques** et d'une **recherche avancée**. Cette dimension échappe totalement au photovoltaïque sur toitures, plus standardisé car destiné à une commercialisation à grande échelle. Il en résulte que l'installation de fermes solaires sur le territoire national apparaît comme le **meilleur moyen d'affiner la technologie et de développer les compétences** des centres de recherche. Une focalisation absolue sur les équipements de production diffuse aboutirait inmanquablement à spécialiser la France sur l'aval de la filière, laissant en friche les premières phases de fabrication des matériaux. Si l'ambition est autre, si elle consiste à conquérir une position significative dans l'ensemble du secteur et non sur les seules activités d'assemblage des modules et de pose des panneaux, **la France ne peut refuser l'ouverture de parcs solaires sur son territoire**.

Enfin, on ne peut négliger l'apport en terme de production des fermes solaires, qui permet d'atteindre des **quantités d'électricité significatives** plus rapidement que la seule action des particuliers convertissant les habitats. Il faut ainsi équiper près de deux mille toitures pour atteindre une puissance installée comparable à la centrale narbonnaise.

B. La problématique foncière

En dépit de leurs aspects positifs, les fermes solaires soulèvent une **objection de principe au regard de l'emprise au sol nécessaire** à leur fonctionnement. Cet inconvénient majeur conduit à réclamer un encadrement réglementaire strict pour prévenir une multiplication des sites spécialisés.

Votre rapporteur s'est rendu en **Espagne**, pays où l'option d'un développement de la production photovoltaïque au sein de centrales a été privilégiée. Sans préjudice de l'économie générale des choix publics opérés au-delà des Pyrénées, qui fera l'objet d'un exposé spécifique plus avant dans le présent rapport, il a été possible d'observer les réalisations obtenues. Au premier regard, leur taille impressionne et leur potentiel de production séduit. Quelques instants de réflexion conduisent toutefois à douter de l'opportunité de transposer à

la France le modèle espagnol. La quantité d'électricité produite apparaît remarquable en grande partie en raison des **conditions d'ensoleillement très favorables** dont bénéficie la péninsule ibérique. Or, plus septentrionale, la France ne reçoit un rayonnement à peu près comparable que dans le pourtour méditerranéen. En outre, les gigantesques installations bénéficient d'un accueil favorable de la part des populations et des collectivités espagnoles concernées en l'**absence manifeste de conflit d'usage** : les déserts de l'Andalousie et de l'Extrême Adour ne se prêtent guère à une autre activité, fût-elle industrielle ou agricole.

L'espace français présente des caractéristiques tout à fait différentes. Un programme massif de construction de centrales photovoltaïques verrait l'**opposition d'un impératif de rentabilité et d'une logique d'aménagement du territoire**. Comment envisager de concentrer sur le littoral méditerranéen, zone hautement touristique, des centaines et des milliers d'hectares de panneaux photovoltaïques ? Il est juste que cette disposition se révélerait particulièrement bénéfique pour le consommateur d'électricité, soumis à une contribution aux charges de service public de l'électricité au montant amoindri. Mais il n'est **pas souhaitable de spécialiser ainsi des territoires entiers**, sans même parler de l'impact sur l'environnement visuel et de la réaction hostile qu'un équipement excessif provoquerait sur la population locale.

D'ores et déjà, votre rapporteur a détecté certaines **tensions spéculatives** sur les terres les mieux exposées. Lors d'un déplacement à Perpignan, il a été fait état de la **tentation des viticulteurs locaux de procéder à l'arrachage** de leurs vignes pour bénéficier des aides subséquentes et consacrer le foncier ainsi libéré à la production photovoltaïque. Ailleurs, dans les Landes, on parle d'opérations de déboisement massif consécutives à un projet photovoltaïque.

Il convient de prendre des **mesures fermes** pour que ce processus, dont les premiers signes sont déjà visibles, ne prenne d'ampleur. La richesse des territoires français ne saurait s'accommoder d'une éviction des activités traditionnelles sur des superficies considérables. En outre, une **logique d'aménagement concerté** doit présider à la répartition de l'effort national en matière de production d'énergie. On ne peut imposer au sud de la France de concentrer les fermes solaires, comme on ne peut sciemment défavoriser leur implantation au nord de la Loire dans l'objectif de sensibiliser les populations.

Pour ces raisons, **votre rapporteur estime que les fermes solaires constituent un point de passage obligé sur la voie du développement de la filière photovoltaïque française à condition que leur implantation réalisée de façon à éviter absolument les conflits d'usage**. Les terrains susceptibles d'accueillir des ensembles résidentiels ou tertiaires, les zones convenant à d'autres types d'industrie de production, les terres arables doivent faire l'objet d'une protection. L'électricité solaire a pour grande qualité sa capacité à être produite dans des espaces déqualifiés, impropres à toute autre activité, alors qu'elle procure même des délais suffisants pour procéder à une opération de dépollution pendant

la période de production. C'est le cas de la centrale de Narbonne repose sur un site classé SEVESO II.

Il y a lieu de **saluer l'initiative prise en ce sens par le ministre de l'environnement, faisant suite à une décision du Président de la République, d'installer une ferme solaire dans chaque région française.** Cette répartition territoriale évite un effet de saturation chez la population et valorise également les territoires. En outre, l'appel d'offres a été rédigé de sorte à privilégier des installations sur des terres monovalentes. Les conflits d'usage seront prévenus. Enfin, les puissances annoncées – trois cents mégawatts – permettront d'accroître significativement la production française d'électricité d'origine solaire tout en donnant matière aux scientifiques dans le cadre de leurs investigations.

III.2.— LES GRANDES TOITURES, UNE PRODUCTION CONSÉQUENTE DÉCENTRALISÉE

Ce qu'on appelle les *grandes toitures* se situe à mi-chemin entre la centrale photovoltaïque de production de masse et le système individuel commercialisé à destination des particuliers. L'idée consiste simplement à équiper de matériaux de conversion photovoltaïque les toits des **bâtiments collectifs** voués au commerce, aux services ou encore à l'administration. Elle recèle à la fois avantages et inconvénients.

D'une part, des surfaces importantes sont **disponibles** sans nécessiter d'aménagement coûteux ni obérer un espace foncier autrement utile pour la collectivité. Ces toitures présentent cependant une **pente faible**, voire nulle, qui nuit au rendement de l'installation solaire.

D'autre part, **la contrainte esthétique se trouve réduite à son minimum.** Les toits des bâtiments collectifs sont rarement visibles depuis le sol et n'entraînent donc pas de difficulté en termes d'acceptabilité sociale.

Les grandes toitures se prêtent ainsi parfaitement au photovoltaïque à condition que l'inclinaison donnée aux cellules installées permette de capter un rayonnement suffisant. Si cette exigence apparaît mineure, elle revêt en réalité une **importance capitale** : une fraction particulièrement réduite des bâtiments existants y répond, de sorte que le marché est parfois qualifié de *mirage*. Votre rapporteur est néanmoins convaincu de son existence à condition d'adopter la technologie adéquate pour **permettre une rentabilité des projets** et ne pas laisser inusitée une telle réserve d'espace. Le **silicium amorphe** paraît ici tout à fait désigné, la superficie couverte compensant ses faibles rendements et sa facilité d'installation n'entravant à aucun moment la disponibilité des locaux équipés. D'autres matériaux peuvent par ailleurs être privilégiés en fonction de l'ensoleillement, de l'inclinaison ou encore des surfaces disponibles. La surimposition de cellules en silicium cristallin est alors acceptable.

Au-delà de la contribution envisageable à la production électrique nationale, forcément significative, une telle démarche relève avant tout de **l'effet**

d'entraînement des populations et de la prévention de potentiels mouvements de rejet à l'encontre du photovoltaïque. Il est légitime de penser que les particuliers sont peu enclins à équiper quelques mètres carrés de leur propre toiture de panneaux solaires s'ils aperçoivent des structures de plusieurs dizaines d'ares totalement dénuées d'aménagements. De même, il est curieux que certaines grandes surfaces aient nanti leurs parcs de stationnement d'ombrières photovoltaïques alors même que le bâtiment principal, largement plus massif, demeure passif du point de vue énergétique – ce paradoxe s'explique en réalité par un **effet d'aubaine** provoqué par la politique de rachat à un tarif réglementé de l'électricité produite.

Votre rapporteur a été informé lors de son déplacement à **Perpignan** de l'équipement en matériel photovoltaïque du marché international Saint Charles à compter de mai 2009 pour une entrée dans la phase de production l'année suivante. Rassemblant près de cent mille tuiles solaires pour un **budget de plus de cinquante millions d'euros**, ce projet correspondait alors à **la plus importante centrale sur toiture au monde** avec une puissance de **neuf mégawatts**. Des couvertures similaires devraient se multiplier, y compris dans des régions moins méridionales que la frontière franco-espagnole, à mesure que le solaire progresse vers la parité réseau. Pragmatiquement, l'équipement des toitures permettrait **d'accroître rapidement la production française d'électricité verte et de satisfaire les objectifs assignés par le Grenelle de l'environnement** sans soulever de protestation en raison d'une trop forte occupation des ressources foncières, à la différence des fermes solaires.

III.3.— LE PHOTOVOLTAÏQUE CHEZ LES PARTICULIERS

A long terme, il fait peu de doutes pour votre rapporteur que **l'avenir de la filière photovoltaïque se trouve dans l'intégration d'équipements de production d'électricité solaire dans les foyers** particuliers. S'il est vrai que les centrales accélèrent le progrès, s'il est clair que les grandes toitures s'avèrent plus faciles à transformer, l'habitat individuel constitue à la fois le débouché traditionnel des premiers fabricants de module et sa cible commerciale la plus étendue.

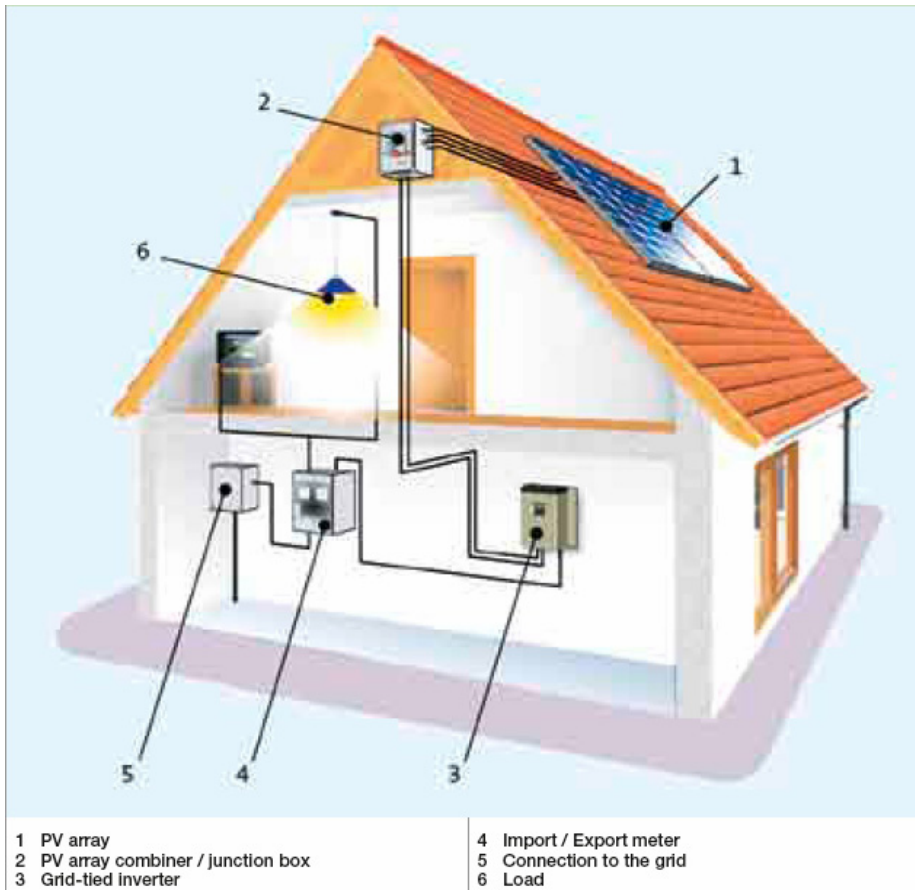
A. Un marché classique : l'habitat isolé

On rappellera pour mémoire que les systèmes photovoltaïques ont trouvé leur première application dans l'équipement électrique des habitations isolées, celles dans lesquelles le coût important des modules demeurait **attractif** face aux sommes exigées pour le raccordement au réseau général de distribution. Ce marché est aujourd'hui correctement satisfait et, s'il n'a pas disparu, la puissance installée qu'il représente demeure stable.

L'essor remarquable du photovoltaïque est en fait lié aux **raccordements** au réseau, dans un objectif qui n'est plus l'autoconsommation mais la production et la **revente** de l'énergie générée.

B. Un marché en plein développement : l'habitat connecté au réseau

Les progrès technologiques ont permis à l'orée des années 2000 de parvenir à des systèmes photovoltaïques performants à coût toujours plus réduit, avec de surcroît la possibilité de réinjecter dans le réseau électrique l'énergie produite. Quoique séduisante, **cette perspective ne parvenait pas encore au seuil de rentabilité**. Il a fallu l'intervention massive de la puissance publique dans la plupart des pays développés, comme l'exposera la seconde partie du présent rapport, pour doubler d'une rentabilité économique l'effort environnemental ainsi consenti par un particulier.



(1) Panneau solaire ; (2) Boîte de jonction ; (3) Onduleur ; (4) Compteur ; (5) Branchement au réseau ; (6) Autoconsommation.

Dans un système de toiture photovoltaïque raccordée au réseau, **l'électricité produite est en courant continu**. Elle est convertie en courant alternatif via un **onduleur**, qui contrôle également l'ensemble de l'installation et la déconnecte du réseau en cas de dysfonctionnement. Le raccordement peut

privilégier soit la **vente de surplus**, c'est-à-dire la consommation prioritaire de l'électricité produite pour les besoins domestiques et l'injection du seul surplus sur le réseau, soit la **vente totale** de l'énergie produite, lorsque le particulier peut compter sur un tarif d'achat. Très similaires techniquement, ces deux modèles se distinguent seulement par une connexion en amont ou en aval du compteur électrique du particulier.

Les populations sont parfois déjà familières avec la présence de panneaux solaires sur les toitures, les technologies solaires thermiques ayant précédé les innovations photovoltaïques. Pour autant, il existe différentes procédures d'équipement des habitats. On distinguera ainsi la **surimposition** et l'**intégration**, ce dernier terme pouvant se décliner à son tour en deux acceptions, l'une concernant le bâtiment au sens technique du terme, l'autre désignant dans un sens plus esthétique le mariage des technologies photovoltaïques dans l'architecture.

La **surimposition** constitue, de fort loin, l'approche la plus **simple**. Elle consiste à **recouvrir une habitation déjà parfaite de cellules photovoltaïques**, moyennant des aménagements plus ou moins importants. Les cellules en silicium cristallin réclament ainsi un passage de l'air pour permettre de refroidir le matériau et de maintenir un rendement élevé ; il faudra par conséquent que l'installateur dispose les modules de sorte que le contact avec la toiture ne génère aucune surchauffe tout en tenant compte des risques liés à la prise au vent et aux intempéries. Surimposer reste le moins délicat en termes techniques car l'habitation répond déjà à toutes les normes établies dans le domaine de la construction. Il suffit de ne pas remettre en cause sa structure, son étanchéité. En revanche, **le résultat esthétique apparaît décevant**, révélant l'**ajout disgracieux** d'un matériau sur un autre. La domination de la République fédérale allemande sur le marché photovoltaïque s'explique en partie par le choix assumé d'une surimposition sur les toitures des particuliers. **Le seul résultat écologique recherché est alors la production énergétique, au détriment de la composante visuelle de l'environnement.**

L'**intégration au bâti** se définit comme la deuxième étape dans le mariage de la construction de logement et de la production d'électricité. Elle voit les matériaux employés pour la conversion photovoltaïque jouer un rôle dans la finalisation du processus de construction. Plus clairement, un système photovoltaïque est considéré comme intégré au bâti dès lors que **son absence retire au logis son caractère habitable**, qu'il ne permet plus d'assurer une protection face à l'extérieur et notamment une étanchéité telle que la réclament les normes en vigueur dans le monde du bâtiment. Les modules photovoltaïques deviennent ici **bivalents** : outre la production d'énergie, ils assurent une seconde fonction. Cette situation influe grandement sur les coûts d'installation. L'équipement d'une maison existante avec des systèmes photovoltaïques intégrés au bâti nécessite le retrait des éléments préexistants (des tuiles par exemple) puis une substitution par les nouveaux matériaux, d'où un coût de main d'œuvre et de matériel nettement plus élevé. En revanche, dans le secteur du bâtiment neuf, l'utilisation immédiate de produits conçus pour se substituer à un élément

classique de la construction permet d'acquérir un seul matériau pour deux fonctions, rendant l'opération financièrement plus attractive.

L'**intégration architecturale** voit enfin l'insertion de matériaux photovoltaïques aux bâtiments présenter un caractère achevé, dans la mesure où ceux-ci répondent non seulement à un **impératif technique** comme précédemment mais également à une **visée esthétique**. Les modules ne sont plus un ajout ni même une substitution, ils sont devenus une part intégrante de l'immeuble conçu comme un ouvrage global. On peut ainsi mentionner le brise-soleil photovoltaïque ou encore les projets de peinture solaire que porte la recherche sur les polymères. Plus actuel, votre rapporteur a pu contempler lors de son déplacement à Bruxelles sur le site de l'usine *Photovoltech* des toits en ardoise comportant des cellules solaires quasiment invisibles à l'œil nu. Il est certes plus aisé de joindre aux modules le noir de l'ardoise que le rouge de la tuile, mais des investigations existent en ce sens qui laissent espérer des innovations à moyen terme. L'intégration architecturale présente les grands avantages d'une **acceptabilité sociale parfaite**, les nouveaux matériaux remplaçant les anciens sans presque être remarqués, et d'une **généralisation aisée** dans les techniques de construction. Elle pâtit néanmoins de deux handicaps majeurs. D'une part, si chacun perçoit intuitivement à quoi elle correspond, il apparaît particulièrement **ardu de définir juridiquement** ce qui relève de l'intégration architecturale et ce qui n'en relève pas. Les autorités allemandes ont d'ailleurs justifié à votre rapporteur ne plus soutenir cette option en raison des contentieux inextricables qu'elle avait nourris devant les juridictions. D'autre part, le développement des produits intégrés s'avère **plus coûteux**, les objectifs esthétiques entrant en conflit avec les objectifs physiques de performance et de rendement. A l'heure actuelle, cette voie est encore balbutiante mais tous estiment que l'avenir de la filière s'y inscrit avec évidence.

Le solaire individuel connecté au réseau connaît dans le monde une **croissance exponentielle pour l'essentiel à partir des techniques de surimposition**, privilégiées notamment en Allemagne. Ce choix ne manque pas de rationalité : il permet un **développement** rapide et standardisé des capacités de production, une concentration de la recherche sur les rendements et donc sur la rentabilité des systèmes, ainsi qu'une **puissance installée importante** à plus court terme dans un contexte de lutte en faveur de l'environnement, sans toutefois générer les inconvénients des centrales en termes de **foncier**.

La France figure parmi les rares pays qui découragent la surimposition au bénéfice de l'intégration. Cette optique, peu pertinente pour ce qui concerne les puissances installées et les capacités industrielles, présente néanmoins l'avantage de constituer dans l'hexagone un marché de niche – à l'heure actuelle – voué à accroître son audience à moyen et long terme. Votre rapporteur, conscient de la **sensibilité particulière du peuple français pour la préservation de ses paysages**, approuve ce choix dans son volet écologique comme dans son volet économique. Si l'efficacité peut s'adjoindre l'esthétique, le doute n'est pas permis. De surcroît, l'avance prise par les principaux acteurs de

l'industrie solaire paraît difficilement rattrapable si le même chemin est poursuivi avec retard. Si la France peut conquérir une bonne place, elle y parviendra par **l'innovation** et non par la reproduction à l'identique de l'existant.

Il restera toutefois de la **responsabilité de la puissance publique de définir précisément le cadre législatif et réglementaire propre à un développement optimal** de la filière. La France s'est déjà engagée fortement en faveur de l'électricité solaire par toute une batterie de dispositifs de soutiens commerciaux et fiscaux. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour soutenir la demande, non plus tant dans le domaine de la rentabilité financière que pour éviter les tracas administratifs, prévenir les hostilités et, surtout, se préserver des gabegies sociales et budgétaires.

CHAPITRE II : L'ACTION PUBLIQUE AU SOUTIEN DU DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Malgré une croissance tout à fait remarquable et une maturation technologique accélérée, le photovoltaïque ne peut exister par lui-même dans une économie de marché tant que la parité réseau n'est pas atteinte. Il revient à la puissance publique, dès lors qu'elle a identifié le potentiel économique et l'intérêt environnemental de la filière, de s'investir pour favoriser sur le territoire national la généralisation des équipements de production.

Cet engagement n'est pas des plus aisés. Il ne se résume ni à une activité de surveillance et de contrôle propre à un secteur déjà développé, ni à une prise de contrôle des usines de conception sur le modèle des entreprises publiques de la Libération. L'Etat stratège se trouve confronté à l'obligation d'accompagner le marché en convainquant les opérateurs de la justesse d'une décision d'équipement, alors même que les conditions de décision actuelle inciteraient plutôt à s'orienter vers d'autres sources d'énergie.

De plus, le photovoltaïque soumet la réglementation administrative et fiscale au défi de s'adapter à des formes nouvelles, encore non concrétisées, d'activité de production. Les normes ont mis du temps à se clarifier et certaines ne le sont d'ailleurs toujours pas. Quel taux de TVA appliquer à une installation photovoltaïque, à partir de quand considérer comme un professionnel le particulier qui tire les bénéfices de la revente de l'électricité produite, faut-il considérer les parcs solaires comme du foncier bâti ou non bâti ? Autant de questions qui demeurent en suspens. La tentation, face à la nouveauté, tient à la création de procédures et de services spécifiques qui se superposent les uns aux autres et finissent inévitablement par occasionner des pertes de temps. Si l'Etat a pu céder à cette facilité dans les premiers instants, les réformes récemment annoncées par le gouvernement laissent entrevoir une simplification devenue nécessaire.

Comme le montrent les statistiques tenant aux capacités de production et à la puissance installée, la France accuse sur ses partenaires un retard sensible dans le développement de son parc photovoltaïque. C'est aussi une chance. Votre rapporteur a pu ainsi se livrer à l'exercice des comparaisons des différents systèmes, constater les succès et tirer les leçons des échecs survenus par-delà les frontières françaises. **L'Allemagne montre le chemin à suivre, l'Espagne les périls à éviter. La France définit à l'heure actuelle sa stratégie**, tant pour soutenir une demande chez les consommateurs d'électricité que pour aménager une réglementation à la fois souple et efficace dans la préservation d'intérêts qu'elle juge significatifs – et que d'autres peuvent légitimement écarter, comme c'est le cas des préoccupations architecturales en République fédérale allemande.

I.— DES SYSTÈMES PUBLICS DE SOUTIEN DANS LA PLUPART DES PAYS DÉVELOPPÉS

Jusqu'à une date récente, les technologies de production photovoltaïque ne permettaient jamais d'atteindre un seuil de rentabilité économique. Ce n'est que très récemment que, dans les régions les plus ensoleillées où l'électricité est disponible à un prix très élevé, les industriels ont pu déclarer avoir atteint la parité réseau. **C'est donc essentiellement grâce aux financements publics d'incitation au développement de la filière que la production d'équipements solaires s'est considérablement accrue** depuis le début du XXI^e siècle.

L'action des Etats en faveur du photovoltaïque est **multiforme** en fonction du segment de marché sur lequel la puissance publique souhaite mettre l'accent. On dénombre trois acteurs principaux sur le marché de l'électricité – les producteurs, les distributeurs et les consommateurs – qui ne réagissent pas aux mêmes types d'incitations. **L'Allemagne a principalement bâti son succès dans la filière à travers un tarif d'achat** dont bénéficient les particuliers. Parallèlement, **le Japon est parvenu à installer une puissance significative sans édicter pareille obligation d'achat** (mais à l'issue d'un engagement fort au cours de la décennie précédente), de même que la Californie.

Votre rapporteur considère opportun de se focaliser sur les mécanismes de soutien existant dans les pays européens sans évoquer dans le détail les pratiques d'Amérique et d'Asie dont les raisonnements économiques et les approches psychologiques biaisent toute tentative de comparaison. Au Japon, la décision d'acquérir un équipement photovoltaïque est considérée comme une assurance contre un risque futur, celui de l'inéluctable hausse des coûts de l'énergie. **Le particulier qui s'équipe achète un lissage sur vingt à trente ans de sa facture électrique**, une visibilité à long terme dégagée des fluctuations des cours des matières premières, dans une optique d'autoconsommation et non d'injection sur le réseau. Toute différente de celle qui prévaut en Europe, l'identification de cette démarche a permis au **gouvernement japonais de limiter drastiquement ses dispositifs de soutien à la filière**, désormais dotée d'une **logique de marché viable et autonome**, renforcée par le caractère insulaire de l'archipel et par des coûts de connexion élevés qui rapprochent d'autant l'horizon de la parité réseau.

Un dispositif de soutien efficace présente quatre caractéristiques nécessaires à son succès. Il apporte d'abord la **sécurité** aux investisseurs. Il trace ensuite une **stratégie à long terme** afin d'éviter un développement par saccades. Il permet également la **réduction des coûts**. Il se limite enfin précisément à la technologie photovoltaïque pour **prévenir un saupoudrage** sur un grand nombre de secteurs et de filières. Trois grands mécanismes d'intervention ont été employés, ce que formalise le tableau ci-dessous. L'expérience a montré que si le tarif d'achat stimule efficacement les marchés par la vision à long terme qu'il procure, les certificats verts n'ont qu'un faible impact en raison des risques élevés appréhendés par les investisseurs. Les subventions et les avantages fiscaux ne sont pour leur part efficace que dans la phase de lancement du marché, pour pallier

l'insuffisance de fonds disponibles et dans la mesure où une demande trop importante entraînerait une hausse insoutenable de la dépense publique. Il reste néanmoins possible de combiner efficacement ces dispositifs entre eux, ce qui est précisément la politique française.

Cibles	Producteurs	Distributeurs	Consommateurs
Objectifs	Rendre attractif l'investissement dans les équipements photovoltaïques	Obliger à produire ou à acheter un volume déterminé d'électricité photovoltaïque	Promouvoir l'autoconsommation et le recours à une énergie propre, réduire l'usage de l'électricité traditionnelle
Mécanismes	Tarif d'achat	Certificats verts	Aides directes et fiscales
Financements	Les coûts supplémentaires se répartissent sur les consommateurs		Budgets publics

I.1.— APERÇU GENERAL DE L'ENSEMBLE DES SYSTÈMES EUROPÉENS DE PROMOTION DU PHOTOVOLTAÏQUE

Le tableau ci-dessous, compilant des données collectées par l'association européenne de l'industrie photovoltaïque à la fin de l'année 2008, recense les différents dispositifs de soutien à l'œuvre dans douze Etats de l'espace européen.

Pays	Tarifs d'achat	Crédit ou réduction d'impôt	Aides diverses
<i>Allemagne</i>	De 35 à 46 centimes en 2008 en fonction de la puissance et de l'installation au sol ou sur toiture. Dégressivité forte , tarifs 2011 ramenés de 26 à 36 centimes. Contrats de 20 ans.	Régime de l' amortissement . Exemption de TVA pour les systèmes commercialisés.	Aides ponctuelles versées par certains Länder. Prêts bonifiés et aménagés.
<i>Belgique</i>	Aucune obligation d'achat . L'énergie produite peut être consommée ou revendue contractuellement à un fournisseur d'électricité. Suivant les régions de la fédération, la surface couverte et la puissance installée, un certificat vert est octroyé pour dix à vingt ans et pour une valeur variant de 15 à 65 centimes d'euros par kWh.	Réduction de 40 % du coût d'équipement à concurrence de 3440€ par résidence pour les particuliers. Déduction de 13,5 % de l'impôt sur les sociétés pour les entreprises.	Subvention d'équipement de 20 % à 50 % du total pour les particuliers et les entreprises, dans des limites variant suivant les régions (taille de la société, puissance installée, crédits consommés, etc.)
<i>Bulgarie</i>	40 centimes d'euros le kWh en dessous de 5 kWc ; 37 centimes au-dessus de cette limite jusque 10 MWc installés. Contrats de 25 ans.		Subvention jusqu'à 20 % par l'agence bulgare en charge des énergies renouvelables.
<i>République tchèque</i>	Entre 48 et 51 centimes d'euros le kWh. Contrats de 20 ans.	Le revenu retiré de la vente est exonéré d'impôts.	Fonds européens de cohésion et de développement régional.

<i>Espagne</i>	32 à 34 centimes le kWh. Système dégressif et quotas de production de 500 MW. Contrats de 25 ans.	Réduction fiscale établie sur trois ans en sifflet, de 2008 à 2010, sur les bénéfices de la filière.	
<i>Grèce</i>	Tarif continental : 40 à 45 centimes le kWh en fonction de la puissance installée. Prime de 5 centimes dans les régions insulaires . Contrats de 10 ans renouvelables une fois. Passage à un régime à l'allemande envisagé.	Réduction d'impôt de 20 % du coût d'installation, plafonné à 700€.	Prêts bonifiés. Subventions d'équipement de 20 % à 40 % suivant la région.
<i>Italie</i>	De 36 à 40 centimes le kWh. Prime de 4 centimes si le système est intégré postérieurement au bâti . Prime de 8 centimes si le système est intégré au bâti dès l'origine . Bonus de 5 % dans des cas spécifiques. Contrats de 20 ans. Dégressivité de 2 % par an.	TVA à taux réduit.	
<i>Portugal</i>	65 centimes le kWh dans la limite de 3 kWc. Contrats de cinq ans, prorogables moyennant une baisse du tarif d'achat.	TVA à taux réduit.	Prêts bonifiés. Subventions d'équipement de 35 % pour les petites et moyennes entreprises.
<i>Roumanie</i>	Pas d'obligation d'achat . Certificats verts de 38€/MWh. Evolution législative attendue.		Fonds européens.
<i>Royaume-Uni</i>	Pas d'obligation d'achat . Certificats verts de 50€/MWh.	TVA à taux réduit.	2500€ au maximum pour les particuliers . 1 000 000€ au maximum pour l'équipement des bâtiments publics.
<i>Suisse</i>	De 30 à 55 centimes le kWh suivant la puissance installée. Ces chiffres incluent des primes à l'installation en toiture et une surprime à l'intégration au bâti . Contrats de 25 ans. Dégressivité à compter de 2010 pour les parcs solaires .		

De ce panorama, il faut d'abord constater la **généralisation croissante du mécanisme de tarif d'achat**. La **réussite du modèle allemand** a conduit la majorité des partenaires européens de Berlin à emprunter des voies d'action similaires. Quelques rares pays privilégient cependant la formule des certificats verts, mais il semble que la tendance soit à une réorientation de leur politique.

On doit surtout mentionner **que les tarifs exposés constituent une base pertinente pour l'appréciation de l'impact de la politique de soutien au photovoltaïque sur les finances publiques**, mais qu'ils ne présentent en rien de

l'efficacité du dispositif au regard des conditions de marché. Votre rapporteur rappelle que la parité réseau est une frontière mouvante suivant les caractéristiques de chaque pays. Le coût de production d'un kWh photovoltaïque varie en fonction de l'ensoleillement du pays concerné, mais son coût comparé à l'énergie disponible sur le réseau dépend surtout des technologies employées pour alimenter ce dernier. **Un tarif élevé n'assure pas automatiquement la rentabilité d'une installation solaire si le système national repose sur une énergie nucléaire compétitive et peu onéreuse ; un tarif très faible suffit à mobiliser les investisseurs dès lors que le réseau fournit ses clients à un prix conséquent.**

Enfin, on relève que les aides directes et fiscales ne semblent pas déterminantes dans les stratégies exposées.

Après avoir procédé à ses premières auditions, votre rapporteur a remarqué la référence fréquente aux situations de l'Allemagne et de l'Espagne, deux des Etats les plus dynamiques sur le marché photovoltaïque au cours des dernières années. Cependant, les conclusions retirées diffèrent fortement. Alors que Berlin jouit d'une grande crédibilité pour avoir su piloter habilement le développement harmonieux de sa filière, les commentaires sur la politique madrilène font plutôt état d'un à-coup malencontreux né d'une programmation défailante. **Deux déplacements opérés au printemps** ont permis de confirmer le ressenti des personnes auditionnées, de **s'inspirer des initiatives allemandes** et de **rechercher les causes de l'échec espagnol.**

I.2.— LE MIRACLE DU PHOTOVOLTAÏQUE ALLEMAND

Il est presque abusif, lorsqu'on évoque le cas de la République fédérale allemande, de considérer le **décollage impressionnant de la filière photovoltaïque** comme un miracle. En effet, ce terme laisse supposer une réussite sans cause matérielle, un succès recueilli uniquement par les vertus de la chance. Au contraire, **la domination du marché par les firmes de Berlin ne doit rien au hasard mais à l'engagement de long terme des pouvoirs publics allié à la détermination d'une population** très impliquée dans les problématiques environnementales. Les entreprises nationales ont pris la tête du marché dans toutes ses composantes technologiques, tout **en investissant massivement dans la recherche et dans le développement.** 14,2 % de l'électricité allemande provenait en 2008 d'une source renouvelable. Le photovoltaïque en représente seulement **1 %** à l'échelle nationale et **3 %** en Bavière, mais **porter la part nationale à 7 %** comme s'y est engagé le gouvernement pour 2020 semble une ambition réaliste.

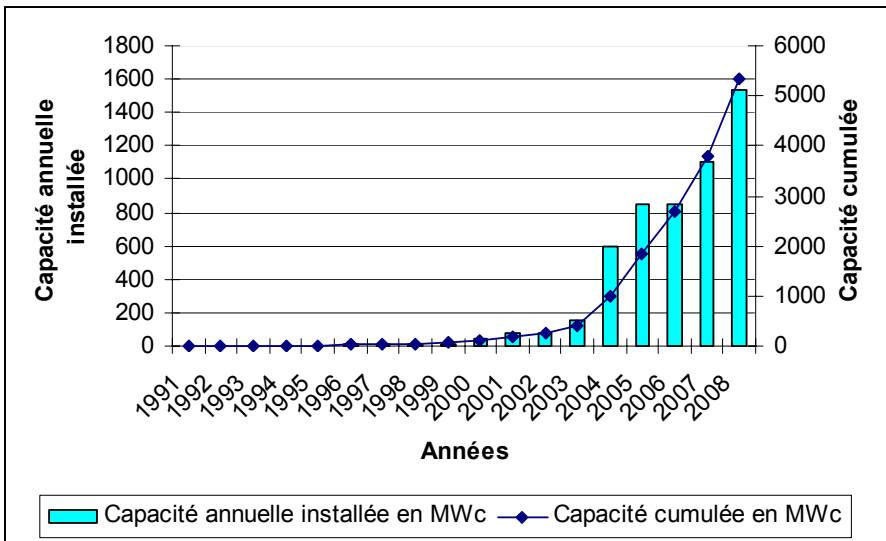
Ouvert en 1991 avec un premier tarif d'achat, le monopole d'Etat avait été écorné sans véritablement craindre une remise en cause. La rémunération initiale de 8,5 centimes d'euros par kilowattheure ne pouvait en aucun cas assurer la rémunération des investissements, mais elle avait ouvert le marché à des producteurs indépendants d'énergies renouvelables. Complété par un **programme 100 000 toits photovoltaïques lancé en 1999** offrant des subventions

d'équipement, le dispositif a démontré son efficacité avec la **loi sur les énergies renouvelables dite EEG (*Erneuerbare-Energien-Gesetz*)** promulguée en 2000.

A. L'Allemagne, place forte du photovoltaïque

En termes de **production de modules**, l'Allemagne occupe le **deuxième rang mondial, juste derrière le Japon**. En termes de **capacité annuelle installée**, elle **s'adjuge de loin la première place**. **Près de la moitié des modules installés dans le monde en 2007 l'ont été en Allemagne** et, après l'année 2008 qui fut celle de l'explosion du marché espagnol, Berlin devrait retrouver cette place en 2009. Le pays possède avec le Luxembourg la **capacité installée par habitant la plus élevée au monde** (près de 50 watts crête fin 2007). Le taux de soutien de la part de la population excède 80 %.

Le graphique ci-dessous expose la croissance remarquable des capacités photovoltaïques allemandes ainsi que les points d'inflexion que représentent en 2000 l'adoption de l'EEG et, en 2004, sa révision dans le sens d'une augmentation des tarifs édictés.



La **révision de l'EEG en 2004** et le succès qui en a découlé sont en partie responsables de la hausse des cours mondiaux du silicium. A l'heure actuelle, l'industrie photovoltaïque allemande génère un **chiffre d'affaires annuel de cinq milliards d'euros**, représentant soixante-quinze entreprises et plus de **quarante mille emplois**. L'exportation constitue un débouché croissant, évaluée entre le tiers et la moitié de la production totale. **La structuration réussie du marché domestique a ouvert la voie de la conquête du marché mondial** pour les entrepreneurs allemands. Le même schéma de développement avait pu être observé au Japon.

Votre rapporteur a eu l'occasion de s'entretenir avec les dirigeants de l'entreprise qui domine le marché mondial de la production de cellules, *Q-Cells*. Fondée en 2001 par quatre personnes, elle compte aujourd'hui 2 600 employés, illustrant parfaitement le **dynamisme** de l'industrie allemande.

B. Pourquoi le photovoltaïque en Allemagne ?

La suprématie allemande en matière d'énergie solaire ne paraît pas frappée de la logique la plus élémentaire. **Le bon sens suggère que les pays les plus performants dans ce domaine devraient logiquement se trouver sinon dans les régions de la planète les plus exposées au rayonnement solaire, du moins parmi des nations à l'économie de marché développée et nanties d'un ensoleillement conséquent**, comparable à celui de l'arc méditerranéen. Même l'intégration des spécificités du marché photovoltaïque et de la notion de parité réseau n'apporte pas de réponse convaincante. L'Allemagne dispose d'un territoire continental et, à l'exception de Kaliningrad, parfaitement contigu. Elle ne connaît pas l'impérieux besoin de substituer aux sources traditionnelles d'énergie une production décentralisée ou répartie. Le choix du solaire n'a donc rien de naturel ni rien de contraint. Il résulte seulement d'une **analyse pertinente de l'économie du secteur de l'énergie et de la situation politique du pays**.

Tout d'abord, le peuple allemand manifeste une **conscience écologique** certaine – peut-être parfois même excessive – dans les questions énergétiques. Les débats sur l'opportunité d'abandonner la filière nucléaire le prouvent au-delà du moindre doute, alors même qu'aucune alternative sérieuse ne semble offerte en dehors d'un renforcement déraisonnable des centrales fossiles. Les citoyens allemands sont prêts à s'engager, y compris financièrement, pour un but perçu comme écologique. Le regard de la société joue également un rôle fort. Ainsi que l'a confié avec un humour un interlocuteur de votre rapporteur, « *investir dans des panneaux solaires est une façon d'assurer le salut de son âme* ». On l'a dit, l'acceptation sociale du photovoltaïque apparaît particulièrement élevée sans que n'entrent en jeu d'autres facteurs comme l'aspect extérieur de l'installation et la préservation des paysages. Les conditions d'une mobilisation des moyens publics en faveur des énergies renouvelables en général et du solaire en particulier étaient donc réunies. L'émergence des interrogations sur la durabilité du modèle de développement et sur la lutte contre le changement climatique a encore accentué ces bonnes dispositions. **Ressentie comme un impératif vital, l'évolution des centrales fossiles, chères et polluantes, vers des énergies propres et inépuisables rassemble l'ensemble de la population**.

Les autres considérations relèvent de l'économie et de la bonne gestion des deniers publics. A la fin de la précédente décennie, l'Allemagne réunifiée n'est pas encore parvenue à estomper le **différentiel de développement entre les Länder de RFA et de RDA**. Cependant, cette histoire particulière lui donne accès à des **crédits européens** pour restructurer l'économie et à des **dérogations dans la prohibition communautaire des aides d'Etat**. Il est possible de procéder à des investissements massifs pour relancer l'économie de l'est du pays. Les entreprises

photovoltaïques qui ont bénéficié de cette manne ont baptisé le lieu de leur établissement la *vallée du soleil*.

Enfin, l'année 2000 a vu la fondation de la *Deutsche ÉNERGIE Agentur* (**DENA**). L'**agence allemande de l'énergie** rassemble les compétences pour l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables en Allemagne. Ses objectifs principaux sont la production, la transformation et l'utilisation de l'énergie de manière rationnelle et respectueuse de l'environnement ainsi que le développement de systèmes énergétiques durables, tenant particulièrement compte de l'exploitation grandissante des énergies renouvelables. Elle initie, coordonne et réalise des projets et des campagnes de **communication** à l'échelle nationale et internationale. Elle informe les consommateurs finaux, coopère avec toutes les forces politiques et économiques de la société et développe des stratégies pour l'approvisionnement énergétique futur. Modèle original, **elle rassemble à parité des sociétaires à la fois publics et privés** : l'Etat allemand, le groupe bancaire KfW (l'équivalent de la Caisse des Dépôts et Consignations), la compagnie d'assurance Allianz SE, les banques Deutsche Bank AG et DZ BANK.

L'ambiance générale favorable à une initiative en faveur du photovoltaïque a fortement influé sur le décollage économique du secteur outre-Rhin. Cependant, l'esprit de sacrifice du peuple allemand ne serait sans doute pas allé jusqu'à des investissements à fonds perdus, quelle que soit la qualité des campagnes de communication. Si l'exemple de Berlin mérite à ce point d'être relevé, c'est parce que la **clairvoyance du législateur** a permis de structurer le marché à partir d'une situation quasiment vierge. C'est là le **succès de la loi EEG** et de son principal instrument, le **tarif d'achat**.

C. Un engagement législatif pour un tarif adapté au marché

La loi EEG a permis de rassurer les investisseurs en offrant des certitudes dans un secteur innovant et mouvant. Elle a reposé dès sa première mouture sur des principes simples applicables à l'ensemble des énergies nouvelles :

- Garantir un **accès prioritaire au réseau** pour les énergies nouvelles renouvelables ;
- Garantir l'**achat de la totalité de l'électricité produite à un prix établi pour vingt ans** ;
- **Réviser annuellement les tarifs** en fonction de la baisse des coûts des technologies spécifiques selon une clef de calcul prévue à l'avance, une redéfinition de cette clef ne s'opérant que tous les quatre ans – autrement dit à chaque législature ;
- **Répartir les coûts additionnels sur les consommateurs d'énergie** électrique et non sur les finances publiques.

Le modèle allemand a fait florès, notamment en France. Il semble inutile de définir dans leur intégralité des concepts bien connus. Le tarif d'achat et

l'obligation de raccordement visent à libérer l'investisseur de la tâche de négociation de son électricité sur le marché, tout en lui assurant une rentabilité financière inaccessible dans des conditions de concurrence normales. Confier la charge du financement de la mesure incitative au consommateur présente en outre l'avantage de ne pas obérer les finances publiques et d'avantager encore les technologies nouvelles sur les méthodes de production classiques.

L'aspect le plus original de l'édifice normatif allemand consiste, d'un point de vue français, dans l'**étagement des tarifs offerts en fonction de la puissance installée ainsi que dans la baisse connue et programmée de ces tarifs** pour les quatre années qui suivent une révision législative. La loi modifiée en 2008 prévoit les évolutions retracées dans le tableau ci-dessous.

Tarif	Installations sur toitures								Installations au sol	
	< 30 kWc		30 à 100 kWc		100 à 1 000 kWc		> 1 000 kWc			
	Baisse	Cts/kWh	Baisse	Cts/kWh	Baisse	Cts/kWh	Baisse	Cts/kWh	Baisse	Cts/kWh
2008		46,75		44,48		43,99		43,99		35,49
2009	8 %	43,01	8 %	40,91	10 %	39,58	25%	33,00	10 %	31,94
2010	8 %	39,57	8 %	37,64	10 %	35,62	10%	29,70	10 %	28,75
2011	9 %	36,01	9 %	34,25	9 %	32,42	9%	27,03	9 %	26,16

A première vue, cette architecture paraît particulièrement **complexe**. Cinq tarifs différents coexistent en Allemagne et ils évoluent de surcroît tous les ans. Dans la pratique néanmoins, cette multiplication des dispositifs soulève peu d'interrogations puisque **chaque catégorie d'investisseur n'est concernée que par un tarif précis**. Il est évident que le particulier n'a que faire du prix d'achat proposé pour une centrale solaire ni pour une toiture d'un mégawatt de puissance. A contrario, l'industriel qui souhaite recouvrir les toits de ses usines s'oriente sans hésitation vers les capacités les plus élevées.

Ce découpage des tarifs proposés en tranches répond à l'objection formulée au cours des travaux préparatoires de la révision de 2004. **Les petites installations perçoivent une rémunération plus importante que les autres dans la mesure où elles se trouvent confrontées à des coûts d'installation plus importants** à l'unité, en l'absence d'économies d'échelle.

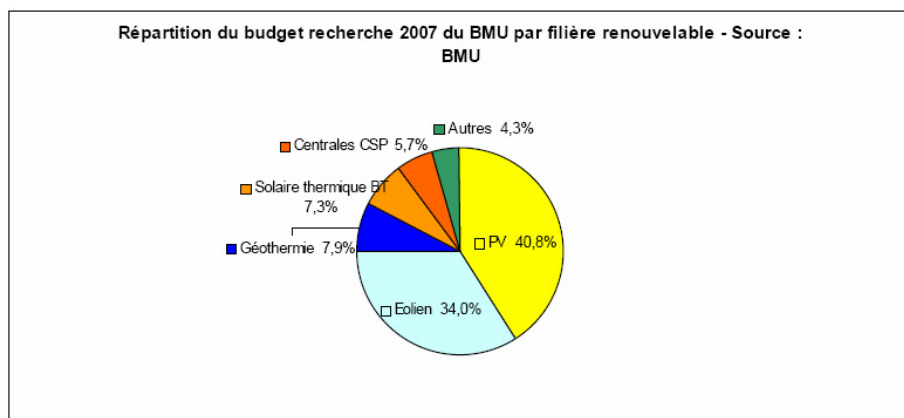
Quant au pourcentage de baisse annoncé d'année en année, que les Allemands nomment *dégression*, il vise à **intégrer la loi d'apprentissage du secteur** qui voit diminuer les coûts d'un cinquième chaque fois que les quantités produites doublent. En effet, un tarif d'achat efficace procède d'un **réglage fin** : trop faible il ne mobilise pas les investisseurs, trop élevé il génère une ruée dommageable pour les finances publiques.

Un dernier paramètre complète le dispositif conçu par le Parlement allemand. Un **corridor de croissance** de la puissance installée récapitule les projections établies sur les quatre années à venir. Si les équipements raccordés

devaient représenter plus de 1,5 GWc en 2009, 1,7 GWc en 2010 et 1,9 GWc en 2011, le taux de dégression se verrait augmenter d'un point. Au contraire, si les nouvelles capacités ne dépassaient pas 0,1 GWc en 2009, 1,1 GWc en 2010 et 1,2 GWc en 2011, ce même taux serait automatiquement réduit d'un point. Le **mécanisme de correction automatique** permet d'éviter le risque d'une altération du fonctionnement du marché : une croissance inattendue ne pénaliserait plus les consommateurs compensant les frais engendrés par le tarif d'achat, une crise subite ne se doublerait plus d'une baisse excessive du prix légalement fixé.

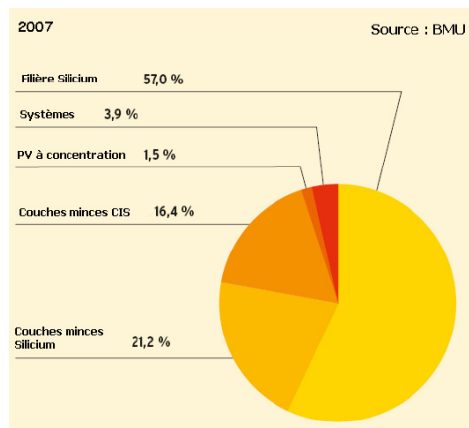
D. Des choix stratégiques : le surimposé au bâti

L'Allemagne a opéré un **choix stratégique** en faveur du solaire photovoltaïque. Il suffit pour s'en convaincre de considérer la **répartition des crédits affectés à la recherche publique** par le ministère allemand de l'environnement.



En 2007, l'Etat a autorisé et financé le lancement de nouveaux projets de recherche sur les énergies renouvelables avec un budget total de 102 millions d'euros. Une grande partie de cette somme, soit **41,6 millions d'euros (40,8 %)**, a été investie dans le photovoltaïque. Cette option se justifie par le potentiel d'innovation du secteur, jugé le plus prometteur. Les sommes publiques ont atteint **50 millions d'euros cette année, soit autant pour le photovoltaïque que pour toutes les autres sources d'énergie renouvelable réunies**. Il faut ajouter à cela un **engagement massif des industriels**, la recherche privée ayant investi 180 millions d'euros au cours de l'année 2008.

La plus grande part du financement accordé en 2007 (57 %) a bénéficié à la **filière du silicium cristallin**, actuellement dominante sur le marché et pour laquelle l'Allemagne jouit à présent d'un avantage technologique. **Les couches minces et les concentrateurs sont également financés**, quoiqu'à un degré moindre. Les personnes rencontrées par votre rapporteur à Berlin ont par ailleurs clairement spécifié ne privilégier aucune voie technologique, même si le **tellurure de cadmium ne paraît pas séduire**.



L'Etat attache un soin particulier à ce que **les résultats de la recherche soient rapidement transférés à l'industrie**. Le centre d'évaluation du photovoltaïque (PV-TEC) de **Fribourg** y contribue de façon significative. Créé avec le soutien gouvernemental, ce centre permet aux producteurs de cellules à base de silicium ainsi qu'aux fabricants de systèmes de **tester** et de développer leurs produits.

L'implication forte de la population en faveur du photovoltaïque apparaît enfin manifestement sur la structure des capacités de production dont dispose l'Allemagne. **L'option retenue est clairement celle de l'habitat individuel puisque celui-ci représente 90 % de la puissance installée**. Le pays ne favorise pas l'implantation des **fermes solaires, jugées attentatoires à l'environnement et excessivement consommatrices de foncier**. Le tarif d'achat qui leur est applicable, proche de celui de la France pour un ensoleillement bien moindre, ne permet qu'une rentabilité très limitée. De surcroît, la puissance publique n'autorise l'édification d'un parc que sur des **terrains déclassés**, qualifiés de *zones de conversion*, impropres à une autre activité. Ces handicaps financiers et réglementaires limitent donc la présence des centrales solaires sur le sol allemand.

Au sein des 90 % d'installations sur toiture, il reste à **distinguer entre les surimpositions et l'intégration au bâti**. Ici également, le consensus atteint est révélé par les chiffres : 89 % relèvent de la première technique d'installation, 1 % seulement de la seconde. **Le critère esthétique ne joue pas un rôle déterminant** dans les décisions d'installation et, de toutes façons, plus rien n'est entrepris pour inverser cette répartition. Interrogés par votre rapporteur, la DENA comme les industriels se sont déclarés tout à **fait intéressés par les technologies d'intégration au bâti**. La suppression du bonus *ad hoc* de cinq centimes par kWh à l'occasion de la révision de l'EEG en 2008 a été unanimement déplorée, même si les raisons budgétaires qui l'ont fondée n'ont pas été contestées. Certains ont estimé que la croissance de l'industrie conduirait naturellement au développement de produits innovants propres à satisfaire la demande d'équipements intégrés, l'avenir de la filière selon eux. En revanche, il n'y a **pas d'ambition manifeste d'investir immédiatement ce segment du marché**, jugé encore trop coûteux face aux profits plus accessibles des technologies surimposées. L'objectif majeur des pouvoirs publics tient toujours à la réduction des coûts.

Particulièrement intéressé par l'approche allemande en termes de tarif et de choix de filière, votre rapporteur a enfin prêté une oreille attentive à la description des **règlementations administratives qui régissent les procédures de raccordement**. La délivrance des autorisations d'installation relève de la

compétence des Länder, toutefois aucune pièce n'est exigée pour les équipements individuels couvrant des surfaces restreintes. **Quant au raccordement, il est réalisé par l'opérateur de réseau le plus proche dans un délai particulièrement bref de six semaines** et dans un cadre procédural posé par la loi. Les contentieux en la matière demeurent en nombre restreint. **La France devra faire sien cet objectif de clarté et de rapidité sous peine de décourager les citoyens de bonne volonté par des délais excessifs et des formalités byzantines.** L'existence d'un système éprouvé dans un pays similaire ne laisse aucun doute sur la faisabilité de la chose.

I.3.— DES CHATEAUX PHOTOVOLTAÏQUES EN ESPAGNE

Selon l'association des industriels espagnols du photovoltaïque (ASIF), **sur les six gigawatts de capacités nouvelles installées dans le monde en 2008, deux et demi l'ont été dans la seule Espagne.** L'année écoulée a vu Madrid supplanter Berlin comme premier marché européen. Pour les producteurs et les installateurs de systèmes solaires, la péninsule représentait un **nouvel Eldorado.**

En réalité, l'Espagne fournit un excellent **exemple de la mise en œuvre défailante d'une politique publique** qui, après un court succès suscité par les colossaux moyens financiers engagés, se trouve confrontée à ses propres excès avec pour seule issue un **désengagement dévastateur** tant pour le monde industriel qu'en termes d'emplois. Votre rapporteur s'est rendu à Madrid où il a entendu un récit riche en enseignements sur ce que la France devra faire – ou plutôt ne pas faire – pour développer harmonieusement sa filière industrielle sans se laisser aveugler par une course aux capacités installées.

A. Un succès inattendu en 2008

L'Espagne se prête relativement mal au photovoltaïque, ou plutôt elle ne s'y prête pas autant en termes économiques que sa position géographique pourrait le laisser penser. Du fait des engagements politiques pris par les gouvernements, et malgré l'absence de fortes installations nucléaires à même de produire l'électricité à bas coût, les prix aux consommateurs sont fixés à un niveau très bas. **Le seuil de parité réseau s'avère par conséquent relativement éloigné dans le temps ;** la seule loi de l'offre et de la demande ne laissait en rien présager l'explosion du marché en 2007 et surtout en 2008.

Une **programmation quinquennale** a été établie par une loi de 2005. Elle fixait un objectif, jugé ambitieux pour l'époque, de **400 MW de puissance installée à l'horizon 2010.** La première année de fonctionnement a été correcte, avec 24 MW connectés pour 25 MW projetés, soit un taux de réalisation presque égal à 100 %. Dès 2006, l'ambition législative a été dépassée du triple, les 32MW prévus devenant 100 MW.

Par imitation des systèmes allemand et français, le décret royal n° 661 de mai 2007 a posé pour les producteurs le bénéfice d'une **obligation d'achat au**

tarif de 45 centimes d'euros le kWh, alors même que les subventions au photovoltaïque avaient été réduites dans les mois précédents. Il en est résulté un **emballement du marché**. D'après les calculs établis par la commission espagnole de l'énergie, **ce tarif rentabilisait les investissements à hauteur de 12 % sur une période garantie de vingt-cinq ans**. L'année 2007 a vu l'installation de 500 MW, la suivante de 2500 MW. **L'Espagne dépassait ainsi l'Allemagne pour devenir le premier Etat solaire d'Europe**.

Pour un pays particulièrement dépendant de ses importations énergétiques et qui refuse de réinvestir dans le nucléaire depuis la fin de la dictature franquiste, ce succès dans le domaine des énergies renouvelables aurait pu porter de belles promesses. La croissance de la production solaire enrichissait le **bouquet énergétique** tout en **créant des emplois** – de 25 000 en 2007, ce sont **60 000 personnes** qui travaillaient dans le secteur photovoltaïque en 2008. En outre, un modèle industriel centré sur les parcs solaires plutôt que sur les toitures individuelles entraînait une implication forte des **équipes de recherche** et la perspective de percées technologiques dont les entreprises nationales auraient pu exploiter les fruits.

En réalité, le décollage espagnol n'était dû qu'à un tarif garanti excessif que les pouvoirs publics ont rapidement jugé **insoutenable**.

B. Une catastrophe économique en 2009

Alors que les contrats de rachat sont établis pour vingt-cinq ans, une rentabilité annuelle de 12 % a attiré non seulement les professionnels de l'industrie photovoltaïque mais aussi les **investisseurs financiers** à la recherche de rendements élevés. **De productif, le secteur est devenu spéculatif** dès lors que la nouvelle de l'attractivité du tarif de 2007 s'est répandue au-delà des cercles industriels. Or, la géographie espagnole conduit à un choix différent de celui de l'Allemagne quant aux moyens de production privilégiés. La question de la préservation des paysages ne se pose pas dans les vastes déserts écrasés de soleil d'Andalousie et d'Extrême Adour. Le foncier n'y fait jamais défaut. **Les fermes solaires représentent donc 95 % de la puissance installée en Espagne**, les toitures collectives et individuelles se répartissant la portion congrue. Plus efficace, **ce modèle de développement favorise également la spéculation à travers la conception de projets pharaoniques permettant de lever des fonds auprès d'une vaste population de souscripteurs**.

Le décret royal de mai 2007 contenait une **disposition de sauvegarde** des finances publiques, insérée pour prévenir un dérapage imprévu, mais qui devant l'ampleur de la ruée s'est en fait révélé **totalelement contre-productive**. La loi quinquennale de 2005 assignait un objectif de 400 MW de puissance installée à l'horizon 2010. Le décret, édicté alors que 2006 venait de voir un résultat effectif égal au triple des ambitions poursuivies, comportait par prudence un **seuil d'alerte** qui commandait l'expiration anticipée du dispositif tarifaire. Dès lors que les installations raccordées devaient atteindre un total de 340 MW, soit 85 % de

l'objectif tracé par la loi, il s'ouvrait une **période d'une année** à l'issue de laquelle un nouveau mécanisme de soutien mieux adapté à la nouvelle réalité du marché serait établi. Ce dispositif, élaboré pour donner aux industriels une visibilité nécessaire à la sécurisation des investissements, a en fait produit un **désastreux effet d'accélération du marché**.

Dès septembre 2007, le seuil d'alerte prévu par le décret royal de mai **était dépassé**. Les promoteurs de fermes solaires disposaient néanmoins encore d'une année dans des **conditions tarifaires particulièrement avantageuses**. Ainsi, dans les trois premiers trimestres de 2008, ce sont 2,5 GW de puissance qui ont été mis en service au prix de 45 centimes d'euros par kilowattheure produit. Ces équipements ont un impact dévastateur sur les finances publiques. **Alors que les prévisions envisageaient l'affectation de 80 millions d'euros en 2008, les engagements pris sous l'empire du décret de mai 2007 atteignent** selon les chiffres de l'EPIA la somme de **1,6 milliard d'euros annuels sur une durée de vingt-cinq ans. Le photovoltaïque espagnol coûterait pour un quart de siècle quarante euros par an à chaque sujet du Roi**, bien que les autorités espagnoles se soient montrées relativement évasives sur ce point. Comme il n'existe pas de contribution levée sur les consommateurs en Espagne, ce prélèvement sera réalisé directement sur les comptes publics.

L'Etat central avait mésestimé le potentiel d'accélération du secteur, mais aussi **l'engagement des communautés autonomes**, désireuses d'attirer ces projets et leurs retombées fiscales et sociales sur leur territoire. **La course aux installations a ainsi été notoirement facilitée par les autorités locales**, compétentes pour délivrer les autorisations, **qui ont fortement réduit leurs exigences pour permettre la validation à temps du plus grand nombre de candidatures**.

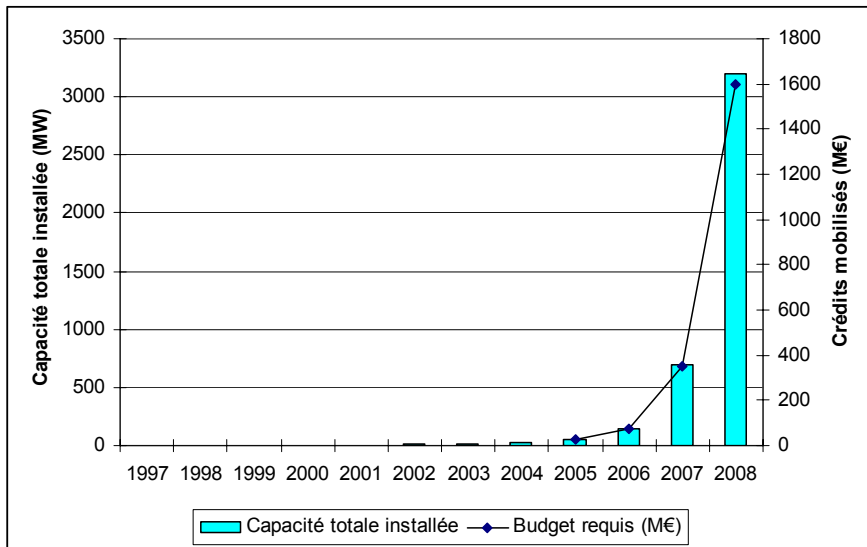
Le tableau et le graphique suivants récapitulent la croissance impressionnante de la puissance photovoltaïque espagnole et son coût pour la collectivité, rapportés aux projections publiques et aux crédits disponibles.

	Nombre d'installations	Capacité totale installée	Capacité installée dans l'année	Capacité installée planifiée	Budget alloué	Budget consommé
		En mégawatts crête			En millions d'euros	
1997	0	1	0			
1998	11	1	0			
1999	13	2	0			
2000	42	2	1			
2001	192	4	2			
2002	788	7	4			
2003	1 566	12	4			
2004	3 233	23	11			

2005	5 328	47	24	25	13	25
2006	9 722	145	98	32	30	75
2007	19 978	693	547	45	50	350
2008	48 581	3 203	2 510	60	80	1 600

Le décret royal n° 1578 de septembre 2008 a mis un terme à cette folle embardée en réduisant drastiquement l'engagement de l'Etat. **Le tarif d'achat s'est trouvé ramené de 45 à 32 centimes d'euros**, avec un système dégressif à l'allemande de 2,6 % par trimestre. Les avantages fiscaux consentis, certes modérés, vont également disparaître en sifflet.

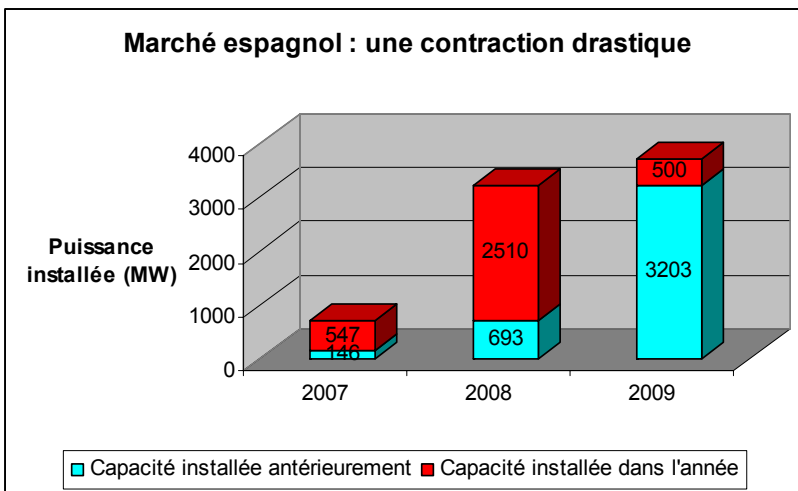
Surtout, **les installations futures font l'objet d'un contingentement au rythme de 100 MW par trimestre** dans les années à venir, avec une tolérance de 100 MW supplémentaires pour 2009 censée adoucir la décroissance du marché. Ces chiffres reviennent simplement à **diviser par cinq le rythme d'équipement de l'année 2008**. Une réorientation est également prévue au profit des installations sur **toiture qui bénéficient de la moitié des autorisations de pose**, afin de décourager les projets de parcs solaires.



Le système retenu est désormais celui d'une éligibilité au tarif soumise à autorisation publique. Au premier trimestre 2009, 700 MW ont été proposés pour un quota total de seulement 150 MW, dont 100 MW en toiture. Cet objectif n'a pas été atteint, la majorité des candidatures exposées portant sur des fermes solaires. **Il faudra l'équivalent de dix-huit mois de quotas pour absorber les seuls projets présentés dans le premier trimestre 2009**. Il a même été confié à votre rapporteur que ce délai pourrait décourager les candidats ce qui ne serait pas jugé comme un effet excessivement néfaste.

Avec un objectif ramené à 0,5 GW en 2009, l'Espagne demeure le **second marché photovoltaïque européen**. Le pays jouit aussi maintenant d'un parc considérable qui, s'il a été érigé à un prix particulièrement onéreux, pourrait constituer un atout. Mais les industriels espagnols dénoncent une situation particulièrement délicate pour leurs entreprises. Alors que la politique de soutien au secteur réduit ses ambitions, la **crise économique mondiale** rend plus difficile l'accès au crédit. Les **prix des hydrocarbures**, retombés à un faible niveau, pénalisent le développement d'une industrie solaire encore éloignée de la parité réseau. **Le marché intérieur a pratiquement disparu** et les professionnels ont négligé pendant la période d'euphorie d'entretenir leurs **réseaux internationaux, aujourd'hui jugés obsolètes** et qui souffrent de la compétition internationale.

Les perspectives de l'industrie photovoltaïque espagnole, jadis florissantes, s'avèrent désormais particulièrement ternes. **De nombreuses entreprises ont déjà fermé leurs portes et le nombre d'emplois menacés est estimé à plus de quarante mille**, alors même que le soutien public est employé plus que de raison au financement des centrales connectées en 2008. La recommandation émise par l'EPIA au regard de l'Espagne ne laisse aucun doute quant à l'avenir de la filière à court terme : « *Serrez les dents !* »



C. Les leçons d'un échec

Votre rapporteur retire de l'échec espagnol une **série de recommandations** pour la définition de la politique française de soutien au photovoltaïque au moment du décollage de la filière :

- **L'électricité solaire est un marché spécifique** pour lequel les retours d'expérience fondés sur les autres types d'énergie renouvelable n'ont qu'une valeur limitée. Les prévisions espagnoles sur l'évolution du secteur éolien avaient toujours été

remarquablement concrétisées. Elles avaient servi de base aux projections opérées pour le solaire.

- **Un tarif trop généreux**, s'il favorise les installations massives et bien qu'il engendre des effets positifs tant pour l'indépendance énergétique que dans la lutte contre le changement climatique, **a de grandes chances d'aboutir à une débâcle économique**. Il attire des **spéculateurs** intéressés par une rétribution maximale sur fonds publics. En outre, dans un contexte européen de libre-échange, il ne peut aboutir qu'à **financer les industries allemandes**.
- La **multiplication des centrales solaires** a constitué une aubaine pour les équipes de recherches espagnoles, qui ont pu expérimenter leurs théories à grande échelle. Elle a aussi, plus négativement, précipité une **course spéculative à la fois sur les constructions de fermes et sur la réservation de terrains susceptibles de les accueillir**. Ce dernier point a peu d'importance sur le territoire espagnol, sa prise en considération sera au contraire cruciale dans un contexte français.
- L'application des principes hérités du modèle allemand implique de donner un maximum de visibilité aux industriels de façon à rassurer leurs bailleurs de fonds. Néanmoins, **dans une industrie naissante prompte aux emballements rapides, il est fondamental que l'Etat conserve une marge de manœuvre afin d'ajuster ses positions en cas de changement brutal des conditions de marché**. Les textes réglementaires établissant le tarif doivent pouvoir évoluer rapidement. Il est souhaitable qu'existe un corridor délimitant une croissance normale qui, une fois excédée, entraîne une **correction automatique de façon à préserver les fonds publics**.

L'Allemagne et l'Espagne, pour des raisons diamétralement opposées, nourrissent la réflexion sur l'opportunité d'une redéfinition de la politique française de soutien au secteur photovoltaïque. **Il convient maintenant d'évaluer les dispositifs nationaux actuels pour détecter les points sur lesquels une réorientation serait nécessaire.**

II.— ÉTAT DES LIEUX DE LA RÉGLEMENTATION FRANÇAISE

La France reçoit 1,3 MWh par m² et par an. **Un carré de 25 km de côté suffit théoriquement à couvrir les besoins nationaux**, soit 5000 km² équipés de cellules offrant un rendement de 10 %. C'est la moitié des surfaces occupées par des toitures ou un sixième de l'emprise foncière des infrastructures publiques. Les pouvoirs publics ont clairement identifié le **potentiel recelé par le rayonnement solaire** pour la satisfaction des besoins en énergie. Dès 2005, la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique assignait par son article 12 un objectif de 50 000 toitures équipées à l'horizon 2010.

Dans un secteur en développement rapide, la réglementation poursuit **deux objectifs**. Elle doit certes **encadrer le développement de la filière** pour éviter une croissance anarchique, préjudiciable à la collectivité et source d'incertitudes pour le producteur d'électricité. Elle vise aussi et surtout à **dépasser l'obstacle normalement insurmontable dans une économie de marché de l'absence de rentabilité économique des équipements photovoltaïques**.

La solution la plus facile et la plus évidente consisterait à imposer l'équipement des habitations particulières en panneaux solaires. Votre rapporteur désapprouve une telle option, a fortiori dans un contexte de crise économique et de cherté de l'immobilier qui contraint les citoyens à bâtir au plus juste leurs financements. Cette obligation légale pourrait éventuellement s'appliquer aux nouvelles constructions, mais l'évolution semble de toutes façons inéluctable à moyen terme. **Dès lors que la parité réseau sera atteinte, soit dans une décennie au plus, il deviendra économiquement judicieux d'investir dans un toit solaire** sans que l'Etat n'ait à intervenir.

L'action publique structure et accompagne l'essor du marché avant que la logique économique ne prenne le relais. Dans cette volonté d'influer sur le devenir de la filière et de généraliser le soutien de la population à l'électricité solaire, les mesures incitatives se sont imposées en France comme dans les autres pays développés. Elles prennent la forme **d'un tarif d'achat** sur la base du modèle allemand complété d'une **orientation particulière en faveur de l'intégration au bâti**, ainsi que de divers **dispositifs fiscaux de soutien à destination des particuliers et des entreprises**. L'addition de ces mécanismes aboutit à une **architecture globale jugée performante quoique perfectible**, pour un coût encore relativement marginal du fait de la faiblesse des capacités installées.

Si le modèle français suscite la critique des opérateurs nationaux comme des observateurs étrangers, c'est en raison du **défaut de clarté de son arsenal administratif**, souvent à juste titre. Les normes qui régissent le secteur ont longtemps **manqué de stabilité et de précision, voire de cohérence**. Les autorités déconcentrées ont tardé à unifier leur doctrine, délivrant des décisions contradictoires entre deux départements voisins. **Il y a aujourd'hui, paradoxalement, une forte demande d'implication de l'Etat central dont la présence fait défaut pour l'harmonie du système. Les délais de raccordement apparaissent également tout à fait excessifs** et il y a quelque chose d'étonnant à entendre exprimer la satisfaction de les voir ramenés à six mois lorsque les autorités allemandes, interrogées sur le sujet, ont fait état d'une attente inférieure à six semaines.

II.1.— LE TARIF D'ACHAT, UN ÉLÉMENT CLASSIQUE DE SOUTIEN A LA FILIÈRE

Comme son efficacité a été prouvée dans chacun des Etats qui l'ont introduit, la France a édicté une **obligation d'achat** de l'électricité produite de

source photovoltaïque. Celle-ci se singularise par l'existence d'une prime d'intégration au bâti : un **supplément tarifaire** est accordé dans la vente de l'énergie produite **dès lors que les équipements sont insérés dans la structure du bâtiment**. En outre, leur **situation d'insularité** vaut à la Corse, aux départements d'outre-mer et aux collectivités de Mayotte et Saint-Pierre-et-Miquelon un tarif de base légèrement plus élevé, de façon à encourager davantage à l'édification d'équipements lourds particulièrement nécessaires dans ces territoires éloignés des réseaux de distribution continentaux. La **commission de régulation de l'énergie** estime cependant que le meilleur ensoleillement de ces régions devrait suffire à rémunérer convenablement les investisseurs.

Institué par l'**arrêté du 10 juillet 2006**, le tarif d'achat est depuis **annuellement revalorisé sur la base des chiffres de l'inflation**. Le tableau ci-dessous expose les prix concédés pour l'année 2009.

	Métropole continentale	Corse et outre-mers
Tarif de base	32,823 centimes par kWh	43,764 centimes par kWh
Tarif intégré au bâti	60,176 centimes par kWh	

Dernier élément de l'obligation d'achat, elle est **capée à un volume horaire**, c'est-à-dire que le maximum de production que le producteur revend sur le réseau est limité au produit de ce volume horaire et de la puissance théorique installée. Cette barrière est fixée à **1 800 heures dans les régions insulaires et à 1 500 heures en métropole continentale** – où elle ne concerne en pratique que le littoral méditerranéen. Là encore, le différentiel s'explique par la situation particulière de l'outre-mer au regard de son approvisionnement électrique. L'intégration du photovoltaïque aux bouquets énergétiques locaux, conditionné encore aux progrès de la recherche sur le stockage de l'électricité, revêt en effet un caractère fondamental pour les pouvoirs publics. La limitation horaire a cependant pour inconvénient de retirer tout intérêt aux technologies de traqueur, la rémunération tombant à 5 centimes du kilowattheure une fois le seuil dépassé.

A. La distinction entre équipement intégré et non intégré

La France promet l'intégration au bâti des technologies photovoltaïques pour un **plus grand respect des territoires et de la composante visuelle de l'environnement**. On imagine en effet difficilement couvrir de panneaux solaires des milliers d'hectares de la côte méditerranéenne, de l'île de beauté ou encore de Martinique, alors même que les paysages préservés de ces régions constituent un atout dans leur rayonnement culturel et leur activité économique. On conçoit tout aussi difficilement de parcourir des rues entières dont l'esthétique serait obérée par des quantités de modules surimposés aux toitures.

Un tel choix n'est pas neutre. Il positionne le marché français dans une logique différente de celle de ses concurrents sur le marché mondial. **La prime tarifaire à l'intégration au bâti**, de quelque 28 centimes en métropole

continentale et 17 centimes dans les régions insulaires, **transcrit dans les faits cette préférence** esthétique revendiquée.

La fonction du tarif intégré au bâti est multiple. Elle vise d'abord à **orienter les investissements vers cette modalité d'équipement** plutôt que vers les fermes solaires (modèle espagnol) et le surimposé (modèle allemand) à travers une **rétribution de l'effort financier consenti**. Votre rapporteur a en effet établi à **20 % le surcoût de l'intégration pour un particulier**, essentiellement lié à des matériaux plus travaillés et donc plus onéreux. Le tarif permet ensuite d'**enraciner une habitude sociale**, prévenant les hostilités éventuelles à l'encontre des technologies photovoltaïques en présentant d'emblée les produits les moins agressifs pour le regard. Enfin, il suppose la présence sur le terrain d'**installateurs compétents et formés** ; or on sait que les principaux **gisements d'emplois** que recèle le secteur reposent dans l'artisanat plus que dans la grande industrie.

L'option tarifaire française comporte néanmoins certains inconvénients. En premier lieu, la prime d'intégration permet de quasiment doubler le bénéfice tiré de la vente d'électricité solaire par rapport à une installation photovoltaïque de base. **Les produits les plus classiques ont alors été occultés par les professionnels autant que par le grand public**. L'intégration au bâti et la technologie photovoltaïque deviennent quasiment synonymes. Ceci répond certes à l'ambition initiale des pouvoirs publics, mais on ne peut nier des **effets dommageables**. Les moquettes photovoltaïques, particulièrement faciles à déployer sur les grandes toitures, ne parviennent par exemple pas à s'imposer aux consommateurs au motif qu'elles offrent une rémunération trop faible. **Le défi de la France n'est pas seulement économique, il est aussi environnemental. Si des technologies non intégrées se prêtent mieux à une production d'énergie non polluante, elles doivent être employées et non écartées car tenues pour pas assez rentables.**

La difficulté majeure induite par le tarif d'intégration au bâti réside surtout dans la délicate délimitation des équipements susceptibles d'entrer dans cette catégorie. C'est la multiplication des contentieux sur ce point devant les tribunaux qui a conduit le législateur allemand à suspendre en 2008 le bonus de cinq centimes par kilowattheure dont bénéficiait l'intégration outre-Rhin. La France a connu et connaît encore de semblables difficultés. **La définition de l'intégration a été édictée par la direction générale de l'énergie et du climat à l'échelon central**, mais il appartenait aux directions régionales de l'industrie, de la recherche et de l'environnement (**DRIRE**) de l'interpréter au cas par cas sur le terrain. La tâche s'est avérée irréalisable dans un secteur si innovant. Confrontées à une masse de demandes et à des produits récents, **les autorités déconcentrées ont agi à la fois dans l'urgence et avec retard, sans coordination. Des décisions contradictoires sur les mêmes équipements, tantôt éligibles à la prime et tantôt inéligibles, ont jeté un certain discrédit sur le secteur.** Des sociétés malicieuses se sont illustrées en développant sur les parcs de stationnement des supermarchés des ombrières photovoltaïques, jugées de fait éligibles au tarif malgré un investissement et une structure bâtie voisins de zéro,

quand dans le même temps la toiture de l'édifice restait inusitée. La nécessité d'une clarification à même de **combattre de tels abus** ne fait aucun doute, même si les effets d'aubaine perdureront probablement malgré tout.

La situation s'est compliquée lorsque la **suppression des certificats administratifs délivrés par les DRIRE – elles-mêmes supprimées** – a été décidée pour restreindre des délais administratifs légitimement perçus comme excessifs. De nombreuses personnes auditionnées ont regretté la **disparition de ces structures seules dépositaires d'une compétence publique dans l'évaluation du caractère intégré des installations solaires**. Il est à redouter que, dans la crainte des contentieux, la plupart des dossiers se voient désormais déclarés éligibles.

Les expériences étrangères apportent une réponse dans ces difficiles définitions. Outre la France, **deux pays européens accordent des bonifications tarifaires aux équipements intégrés au bâti. Il s'agit de l'Italie et de la Suisse**. Alors que Paris a opté pour une dichotomie entre intégré au bâti et non intégré, Rome et Berne privilégient un système à trois niveaux. Le tarif de base reste applicable aux installations au sol. Une prime est versée lorsque les équipements sont **accrochés au bâti** et une surprime est octroyée lorsqu'ils sont **intégrés au bâti**. L'Italie réserve le terme d'intégration aux équipements présents **dès l'origine** dans la conception de l'habitation. Si elle a pour effet de **réserver au secteur de l'immobilier neuf** le tarif maximum, cette initiative présente l'avantage de simplifier grandement l'appréciation de l'administration.

B. Repenser le tarif d'achat

Efficace dans le soutien au développement de la filière, le tarif d'achat verra prochainement ses **modalités repensées** pour une meilleure adaptation à l'évolution technologique et économique du secteur. La commission de régulation de l'énergie, qui s'inquiète de la montée en charge rapide du dispositif au regard des volumes électriques recueillis, délivre une observation tout à fait juste mais parcellaire. Il est certain que le retrait du soutien public français au photovoltaïque n'empêcherait ni la croissance du marché ni les gains technologiques à l'échelle mondiale. D'autres sources d'énergie seraient, en attendant, moins coûteuses. Mais **l'engagement étatique a un sens : il construit une filière économique nationale et il pose les bases d'une insertion harmonieuse des cellules solaires dans le paysage français**.

A l'aune de ces deux ambitions, votre rapporteur propose d'ouvrir des champs de réflexion pour la refonte du tarif d'achat vers **plus d'efficacité et plus de justice dans l'approche territoriale du phénomène**.

a) Instituer une catégorie intermédiaire ?

Le ministre de l'Environnement a annoncé le 15 mai 2009 qu'une **catégorie tierce** serait instituée entre le tarif de base et le tarif bonifié pour intégration au bâti. **Fixé à 45 centimes d'euros** par kilowattheure, cet échelon

intermédiaire sera « *destiné à faciliter le déploiement de panneaux photovoltaïques sur les bâtiments professionnels (supermarchés, bâtiments industriels, agricoles de grande taille...)*. » Ce sont donc les **grandes toitures** qui bénéficieraient de cette initiative gouvernementale, tandis que l'intégration au bâti telle qu'elle est appréhendée en ce moment continuerait de bénéficier aux particuliers. **Votre rapporteur approuve la réforme qui permettra d'employer utilement des dizaines de milliers de mètres carrés pour l'heure uniquement voués à assurer une étanchéité.** Couplée à l'élargissement à l'ensemble des collectivités territoriales des bénéfices des tarifs d'achat de l'électricité, la mesure permettra aussi de rentabiliser les collèges, lycées et autres établissements publics.

Cette avancée, pourtant, pourrait être mise à profit **pour clarifier la notion d'intégration au bâti.** S'il apparaissait trop rigoureux de renvoyer au tarif de base les **équipements surimposés**, particulièrement lorsqu'ils s'adaptent parfaitement au cas d'espèce comme c'est parfois le cas pour les couches minces de silicium, il serait légitime de **les orienter vers ce niveau intermédiaire** propre à assurer leur rentabilité sans générer un effet de rente. **La prime maximale serait alors réservée aux seuls matériaux effectivement conçus et dessinés pour se substituer à un élément de construction.**

Une **autre piste** défendue par votre rapporteur consisterait à distinguer la notion d'intégration telle que l'emploie le secteur du bâtiment – contribuer au clos et au couvert et ne pas pouvoir disparaître sans rendre impropre l'habitation – de l'approche, plus subtile, d'**intégration architecturale.** Alors que des solutions standardisées existent déjà pour la première, la seconde reste à conquérir tant elle exige une réflexion et une capacité d'innovation de la part de l'ensemble du monde de la construction. **L'investissement supplémentaire serait habilement rétribué par une prime tarifaire.** Il resterait alors à définir sans ambiguïté les équipements éligibles. Ce point sera abordé plus avant parmi les propositions d'évolution relatives au cadre administratif et réglementaire.

b) Poser une règle de dégressivité ?

Le premier tarif français, en 2001, s'appuyait déjà sur le principe d'une dégressivité de 5 % par an. Elle avait été néanmoins reportée presque immédiatement en l'absence de réaction suffisante du marché à la stimulation publique. La situation est aujourd'hui différente. **Le marché français est en phase de décollage et le coût des modules connaît une baisse constante** qui ne justifie plus l'indexation du tarif sur l'inflation. De surcroît, même si sa polarisation sur les parcs solaires ne saurait être transposée au secteur photovoltaïque français, **l'expérience de l'Espagne met en exergue les dangers d'un tarif trop élevé sur la structuration saine de la filière.** De l'avis général des personnes auditionnées, le tarif intégré est désormais **trop généreux dans les régions méridionales du pays.** L'idée d'une correction à la baisse recueille un **consensus**, y compris parmi les professionnels de l'industrie et de l'artisanat.

On doit toutefois prendre garde à ne pas donner à cette baisse un caractère exagérément prononcé. D'une part, la réduction du coût des

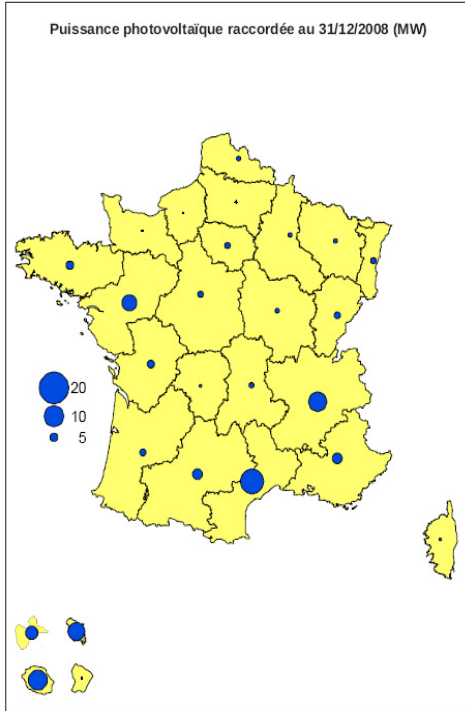
technologies photovoltaïques ne se répercute pas proportionnellement sur celui des systèmes, dans lesquels les prix du verre et de l'électronique semblent relativement incompressibles. D'autre part, une diminution brutale gênerait la **demande des particuliers** et aurait des **conséquences rigoureuses sur l'activité des installateurs**.

L'alternative ouverte aux pouvoirs publics tient à privilégier une baisse rapide du tarif ou une diminution lente étalée sur plusieurs années sur le modèle de la dégression allemande. **Sous réserve qu'elle soit couplée à des mesures de correction automatique en fonction de la progression des raccordements et que l'Etat préserve ses moyens de réaction en cas d'altération manifeste des conditions de marché, votre rapporteur se prononce en faveur de la seconde solution. Plus que de nouveaux crédits, les professionnels rencontrés ont demandé la visibilité nécessaire à l'établissement de leur stratégie industrielle et commerciale.** Une décision abrupte pourrait pénaliser des développements en cours. Au contraire, une approche plus douce laissera à chacun le temps de corriger ses positions. Il reviendrait à la sagacité gouvernementale d'estimer la valeur optimale du taux de dégressivité annuelle. **Au regard des expériences allemande et espagnole ainsi que de l'estimation de la date à laquelle la France atteindra la parité réseau, votre rapporteur suggère que ce taux soit compris entre 7 % et 8 %.**

c) Régionaliser le tarif ?

Une dernière piste d'évolution du tarif consiste à aborder la **thématique de l'aménagement du territoire**. La géographie française en fait, comme souvent, un Etat atypique. Contrairement à ses voisins européens qui bénéficient d'un rayonnement solaire relativement uniforme sur l'ensemble de leur territoire – il n'y pas de différence fondamentale entre Hambourg et Munich par exemple – **la France se trouve littéralement coupée en deux entités, entre une moitié nord aux caractéristiques comparables à l'Allemagne et une moitié sud proche des conditions d'ensoleillement de Barcelone**. Dans un cadre tarifaire égalitaire, cette différence physique entraîne des conséquences économiques qui se traduisent par une concentration des capacités de production au sud du pays.

Votre rapporteur juge cette situation particulièrement **néfaste pour l'acceptabilité sociale du photovoltaïque**. On ne peut prétendre familiariser les citoyens avec une technologie s'il apparaît qu'une frange significative de la population n'y a en pratique pas accès. En outre, la multiplication des infrastructures électriques dans un nombre limité de départements pourrait susciter un **rejet massif** et indifférencié de la part des habitants. On ne peut imposer successivement au sud du Languedoc-Roussillon une ligne à très haute tension pour l'interconnexion espagnole, un parc éolien conséquent pour exploiter la tramontane et de surcroît des panneaux solaires en nombre pour profiter de l'ensoleillement. Enfin, cette restriction du marché **pénalise les industriels français** contraints de s'orienter vers l'international pour pallier l'exiguïté du marché français.



Région	Puissance (en MW) raccordée fin 2008
Languedoc-Roussillon	13,06
Réunion	9,14
Rhône-Alpes	8,68
Martinique	7,28
Pays-de-la-Loire	6,45
Guadeloupe	4,37
Midi-Pyrénées	3,02
PACA	2,87
Bretagne	2,02
Poitou-Charentes	1,61
Aquitaine	1,41
Franche-Comté	1,35
Alsace	1,03
Ile-de-France	1,03
Centre	0,98
Auvergne	0,86
Nord-Pas-de-Calais	0,72
Bourgogne	0,72
Lorraine	0,62
Champagne-Ardenne	0,56
Limousin	0,40
Corse	0,25
Picardie	0,15
Basse-Normandie	0,10
Guyane	0,05
Haute-Normandie	0,03
Total	68,74

En sus de la réduction du tarif jugé excessif dans les conditions dont bénéficie le pourtour méditerranéen, la question se pose donc de sa **déclinaison géographique et de sa régionalisation**. Malgré les risques certains en termes de lisibilité de l'action publique, les considérations d'aménagement du territoire font incliner votre rapporteur en ce sens. La répartition uniforme des technologies revêt un caractère impératif pour le bon développement de la filière et, du reste, l'état actuel présente un désagréable aspect discriminatoire puisqu'il permet aux installations du sud une rentabilité bien supérieure financée à due proportion par les contributions des résidents de la partie nord du pays.

La principale question que pose une volonté de différenciation du tarif jusque-là national consiste en la gestion des effets de seuil. Une **régionalisation** calquée sur la carte administrative n'est pas une option envisageable car les circonscriptions administratives ne suivent absolument pas les variations du soleil.

La solution la plus juste qui ait été suggérée à votre rapporteur consisterait à pondérer le tarif alloué par le **gradient solaire** du lieu d'installation. L'accès à cette information en ligne ne présente pas de difficulté majeure. Elle permet la meilleure adaptation possible de l'action publique aux circonstances. Cependant,

elle apparaît exagérément **complexe** pour les particuliers comme pour les services administratifs chargés du traitement de leur demande.

Dans une réflexion limitée aux fermes solaires, il a été proposé une augmentation de tarif de 5 % lorsque le rayonnement lumineux décroît de 10 %. Il faut alors se poser la question de savoir si le **nombre trop élevé d'échelons tarifaires** à décliner est acceptable.

La logique la plus compréhensible par tous mais minimale consisterait à **séparer la France en deux**, le tarif nord dépassant le tarif sud d'environ **20 %** avec une ligne géographique la plus judicieusement établie.

C. Les moyens d'une ambition : la contribution au service public de l'électricité

Comme en République fédérale allemande, le financement du tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque ne repose pas sur les crédits nationaux mais sur la contribution des consommateurs. **En 2009 le photovoltaïque représentera 85 millions d'euros sur la facture des Français.** Cette somme devrait atteindre **2,2 milliards d'euros en 2020 si l'objectif de 5,4 GW assigné lors du Grenelle de l'Environnement est atteint.** A titre indicatif, ce chiffre de deux milliards d'euros a été dépassé par l'Allemagne en 2007.

Les sommes engagées par le photovoltaïque sont importantes, néanmoins elles restent **acceptables** pour l'heure eu égard au faible volume de marché concerné. En outre, cette enveloppe bénéficiera prochainement de la sortie du dispositif des équipements de cogénérations, qui consomment une part bien plus significative de l'enveloppe globale, laquelle pourra alors se voir réaffectée.

Votre rapporteur ne nourrit **pas d'inquiétude particulière sur les charges induites par le photovoltaïque sur la CSPE** dès lors que le gouvernement saura se prémunir contre une redite du scénario espagnol. La marche constante vers la parité réseau et l'instauration d'une dégressivité du tarif devraient permettre par ailleurs de maintenir les coûts sous contrôle de la puissance publique.

II.2.— UN DISPOSITIF FISCAL INCITATIF ET EN COURS DE CONSOLIDATION

L'autre engagement public en faveur du développement du photovoltaïque en France prend la **forme plus traditionnelle d'incitations fiscales.** Le dispositif français, après quelques errements lors de l'émergence de l'activité, se construit de sorte à **favoriser grandement tous les types d'installations par tous les types de public.**

On mentionnera ici **l'effet structurant sur le marché des décisions de la direction de la législation fiscale.** La **fixation à 3 kWc de la capacité installée** en dessous de laquelle le particulier est présumé ne pas conduire une activité commerciale taxable en conséquence a orienté les opérateurs vers le

développement de produits correspondant précisément à cette valeur. On pourrait regretter que des surfaces plus grandes ne soient pas utilisées pour de simples raisons de réglementation fiscale, néanmoins cette puissance correspond globalement à l'**activité électrique d'un foyer français moyen**. Elle ne manque donc pas de cohérence.

A. Le crédit d'impôt, un élément majeur pour les particuliers

L'article 200 *quater* du code général des impôts a institué en 2005 un **crédit d'impôt en faveur des équipements producteurs d'énergie de source renouvelable dans les résidences principales**. Initialement fixé pour le photovoltaïque à 40 % du prix d'achat des matériels et porté dès 2006 à **50 %**, il est reconnu comme un élément de poids dans la promotion de l'électricité solaire.

En pratique, une personne seule bénéficie d'une enveloppe de **8 000€** pour l'acquisition d'un système photovoltaïque destiné à sa résidence principale. Cette somme **double en présence d'un couple**. Si le foyer fiscal est imposable pour plus de l'enveloppe disponible, l'incitation prend la forme d'une réduction d'impôt qui vient diminuer le montant annuel exigé par l'administration. Si le montant dû par les particuliers demeure inférieur à l'enveloppe disponible, le fisc concède la différence par un versement *ad hoc*. Contributeurs ou non, tous les Français jouissent par conséquent également de la mesure. Le dispositif de l'article 200 *quater* a été **prorogé jusqu'à 2012** et récemment élargi aux propriétaires bailleurs pour les logements qu'ils donnent à louer.

On ne négligera pas l'**influence psychologique considérable** du crédit d'impôt sur la décision d'équipement des ménages. L'économie d'impôt est certaine, garantie par l'Etat. Elle n'est certes pas délivrée à la suite immédiate de l'achat mais à l'occasion de l'exercice fiscal suivant, mais son occurrence ne fait pas de doute dès lors que la famille parvient à faire l'avance des fonds nécessaires.

Des difficultés sont survenues dans les premiers temps du crédit d'impôt. On constatait parfois des **confusions** dans les sommes déclarées entre frais d'acquisition du matériel et coût de la main d'œuvre, et des redressements intempestifs ont pu jeter le trouble sur la mesure. Par ailleurs, les collectivités locales ont eu la mauvaise surprise de constater que les aides d'équipement qu'elles octroyaient se réduisaient mécaniquement de moitié dans le mécanisme du crédit d'impôt. Elles ont depuis corrigé leur erreur en finançant la pose plutôt que l'achat des pièces. **Les professionnels jouent un rôle de conseil** du particulier dans la déclaration de son achat, évitant les contentieux éventuels.

Enfin, du fait à nouveau du volume encore faible du marché de l'électricité solaire, le crédit d'impôt pour l'équipement photovoltaïque n'exerce qu'un **poids raisonnable sur les finances publiques**. Évalué en 2007 à 21 millions d'euros, il a progressé **en 2008 à 26,7 millions d'euros**. Ces sommes sont à rapporter aux quelque 700 millions d'euros annuels consacrés à l'isolation des parois vitrées et au demi milliard d'euros consacré aux pompes à chaleur.

B. Des avantages dans les autres formes de prélèvement fiscal

Le crédit d'impôt n'est pas le seul dispositif de soutien de la filière photovoltaïque. Fiscalité nationale ou locale, fiscalité directe ou indirecte, **tous les prélèvements admettent des dérogations spéciales au bénéfice de la production d'électricité solaire.**

En ce qui concerne **l'impôt sur le revenu des personnes physiques**, il est loisible aux agriculteurs depuis fin 2007 de déclarer en tant que **bénéfices agricoles** les revenus accessoires tirés de l'exploitation d'un système photovoltaïque à condition qu'ils n'excèdent ni 50 % des recettes tirées de l'activité agricole ni un montant de 100 000 euros. En outre, en 2008, une loi de finances a **exonéré d'imposition les revenus générés par un système d'une puissance inférieure à trois kilowatts crête.**

Les entreprises qui investissent dans un équipement photovoltaïque retirent le montant correspondant à la dépense de leurs bénéfices soumis à **l'impôt sur les sociétés**, ce qui équivaut à une subvention de 33 % des sommes engagées.

Concernant le régime de la **taxe professionnelle**, l'activité photovoltaïque est taxable mais les panneaux bénéficient d'un abattement de 50 % qui peut être porté à 100 % par une délibération de la collectivité territoriale. Le dégrèvement est total jusqu'à 2009. Au-delà, **la volonté manifestée par le Président de la République d'abolir cet impôt devrait trancher la question.** Il faut signaler que l'imposition est réalisée à compter de l'année de raccordement, par dérogation au droit commun qui n'exige le paiement d'une contribution qu'à compter de l'année suivant le fait générateur.

La **taxe foncière** ne concerne plus les bâtiments ruraux équipés de systèmes photovoltaïques depuis la loi de finances rectificative pour 2009, même si des interrogations perdurent sur le régime applicable aux coopératives agricoles non bénéficiaires de la mesure. Les panneaux eux-mêmes, considérés comme des équipements et biens mobiliers, n'entrent pas dans le champ de l'impôt.

Enfin la **taxe sur la valeur ajoutée** a vu son régime précisé par un rescrit du 4 décembre 2007 : elle s'applique au taux réduit pour l'installation de panneaux dont la puissance se limite à **3 kWc**, au taux normal si elle excède cette limite. Le produit de la vente par les particuliers est exonéré. Les fermes solaires sont pour leur part toujours soumises au taux normal.

C. Un flou persistant sur le régime des fermes solaires

Les corrections apportées par les lois de finances ainsi que les rescrits successifs ont conduit à édifier un système d'imposition complexe mais néanmoins relativement performant et exhaustif. Votre rapporteur a toutefois relevé une **hésitation** de la part de la direction de la législation fiscale lorsqu'il s'est agi de **définir le régime de taxe foncière applicable aux parcs solaires.** Le défaut de préparation est légitime dans le sens où la première centrale française

vient à peine de commencer son fonctionnement dans l'Aude et qu'elle n'a donc jamais encore connu d'imposition.

Lors de sa visite sur les lieux, votre rapporteur s'était enquis des projections dressées par les juristes de l'entreprise EDF-EN. Une somme de 400 000€ avait été prévue pour règlement de la taxe professionnelle. Quant à la taxe foncière, **l'imposition attendue était celle d'un terrain non bâti**. L'emprise au sol des panneaux est en effet minime, ils sont rapidement démontables et, s'il est peut-être délicat de les ranger dans la catégorie des meubles, il l'est plus encore de les envisager comme des bâtiments.

Lors de son audition, la direction de la législation fiscale a reconnu ne pas avoir préparé sa position tant la situation présentait le **caractère de la nouveauté**. Toutefois, l'article 1381 5° du CGI apporte une réponse relativement claire, en soumettant à la taxe foncière sur les propriétés bâties *« les terrains non cultivés employés à un usage commercial ou industriel, tels que chantiers, lieux de dépôt de marchandises et autres emplacements de même nature, soit que le propriétaire les occupe, soit qu'il les fasse occuper par d'autres à titre gratuit ou onéreux. »*

Votre rapporteur appelle instamment l'administration fiscale à préciser sa position et à la communiquer aux exploitants des parcs photovoltaïques français. Le différentiel de taux entre les taxes sur les propriétés foncières bâties et non bâties pourrait avoir un effet dévastateur sur le rendement de ces structures dès lors qu'il s'applique à plusieurs dizaines d'hectares.

II.3.— UN CADRE ADMINISTRATIF INSUFFISAMMENT PERFORMANT

Le grand reproche adressé par les personnes auditionnées à l'organisation française de soutien au photovoltaïque concerne son volet administratif. **Les pouvoirs publics ne sont pas jugés suffisamment impliqués, d'où une inadéquation entre les textes en vigueur et les pratiques constatées**. Les délais nécessaires à un raccordement freinent aussi grandement la montée en puissance des capacités françaises de production. Les **décisions récemment prises par le gouvernement** dans ce domaine, très attendues par le secteur et totalement **soutenues par votre rapporteur**, devraient permettre d'éviter ces écueils à l'avenir.

A. Un manque d'unité dans la doctrine administrative

Les professionnels du solaire déplorent une **présence insuffisante de l'administration**, au sens le plus littéral du terme, dans un secteur en décollage qui réclame une attention permanente et une compétence affirmée tant sur le terrain que dans les tâches de conception et de suivi. Votre rapporteur a eu la surprise de voir exprimée la **demande d'une augmentation du nombre de fonctionnaires affectés au dossier photovoltaïque dans l'administration centrale**, sans préjudice de leur action à travers l'ADEME et les administrations

déconcentrées. Seul un personnel à mi-temps est identifiable pour le suivi spécifique du photovoltaïque à l'heure actuelle d'après le syndicat des énergies renouvelables. Cet investissement humain apparaît notoirement lacunaire, même s'il ne retrace pas l'ensemble des **moyens humains mobilisés par les pouvoirs publics** dans leur soutien et leur suivi de la filière.

Les investigations de votre rapporteur ont révélé deux **impuissances** particulièrement dommageables dans l'action de l'administration. La première tient au **flou juridique autour des parcs solaires**, pour lesquels les autorités déconcentrées ont dû élaborer une doctrine propre sans le soutien de l'échelon central, avec les différences de procédure qu'implique cette solution d'une région à l'autre. La seconde, déjà abordée plus haut, concerne l'application pratique de **l'idée d'intégration au bâti**.

a) Les fermes solaires nécessitent-elles un permis de construire ?

La visite de votre rapporteur sur le site de Narbonne a été l'occasion d'observer directement le fonctionnement d'un parc solaire de plusieurs hectares. L'interrogation a cependant été grande lorsque les interlocuteurs rencontrés n'ont pas été en mesure de préciser si l'ouvrage bénéficiait ou non d'un **permis de construire**. Les démarches effectuées en ce sens auprès de la préfecture ont rencontré la circonspection des autorités déconcentrées, dépourvues de repères face à un tel dossier. C'est finalement sur la **base d'une décision implicite** que la centrale solaire a été érigée, **nul ne voulant parapher expressément l'autorisation** d'implantation des panneaux solaires sur plus de vingt hectares.

Ce récit paraît ubuesque pour des constructions représentant un investissement de plusieurs **dizaines de millions d'euros**. On sait cependant que l'administration n'est pas familière des parcs solaires et que le fisc peine pareillement à déterminer clairement le régime d'imposition applicable. En fait, la réglementation relative à l'urbanisme issue du **décret du 5 janvier 2007** ne comporte aucune disposition spécifique à destination des panneaux photovoltaïques. En conséquence, ce sont les règles de droit commun qui trouvent à s'appliquer. Or l'article R. 421-2 du code de l'urbanisme **dispense de toute formalité – permis de construire ou déclaration préalable** – les « *constructions nouvelles dont la hauteur au-dessus du sol n'excède pas douze mètres et qui n'ont pas pour effet de créer de surface de plancher ou qui ont pour effet de créer une surface hors œuvre brute inférieure ou égale à deux mètres carrés.* » A l'exception des bâtiments de contrôle des installations, une centrale photovoltaïque répond pleinement à ces exigences. **Les nouvelles implantations seraient donc dénuées de tout contrôle public**, sinon sur la base des plans locaux d'urbanisme et de la loi sur l'eau à travers ses dispositions relatives à l'imperméabilisation des sols. **Cette lecture du droit positif apparaît inacceptable**. La tolérance introduite par le code de l'urbanisme vise avec évidence à alléger les formalités pour l'édification de structures de faible importance, elle ne peut légitimement bénéficier à des équipements couvrant plusieurs hectares.

Pour donner une réponse plus cohérente dans le cadre de leurs compétences, **les préfets de la région Languedoc-Roussillon ont déterminé en commun une procédure** qui permet aux industriels d'avancer tout en maintenant une supervision minimale. Cette initiative est louable bien qu'elle **nuise à l'uniformité du droit sur le territoire** national. Les représentants de l'Etat en Provence Alpes Côte d'Azur se sont pareillement entendus sur la conduite à tenir devant les demandes de permis de construire pour aboutir à des **préconisations assez différentes** et à des **compositions de dossier relativement éloignées**.

Votre rapporteur s'est enquis de cette situation auprès du gouvernement qui lui a communiqué sa **volonté de simplification**. Le ministre de l'Environnement a annoncé en mai dernier le **passage à un régime de déclaration de travaux pour les particuliers** désireux d'installer des équipements photovoltaïques. Une démarche comparable est opérée pour les parcs solaires, sans évidemment départir l'administration de son pouvoir d'appréciation sur les projets significatifs en terme d'urbanisme et d'impact sur le paysage. **Aucune formalité ne serait requise pour les parcs d'une puissance inférieure à 100 kW, une simple déclaration permettrait l'édification de fermes représentant 100 à 250 kW, enfin un permis de construire serait exigé pour les projets excédant ce seuil**. Cette unification du droit applicable à l'ensemble du territoire national est bienvenue, elle rend à la puissance publique ses prérogatives de protection des sites et de contrôle des installations industrielles.

b) Comment juger l'intégration au bâti ?

Le grand défi de l'administration dans la mise en œuvre de sa propre politique tient à la **définition de l'intégration** et à son appréciation pour **l'attribution de la prime tarifaire spécifique**. L'activité des DRIRE n'apportait pas à l'édifice la cohérence absolument incontournable dans l'ensemble des régions françaises, et si leur suppression semble faciliter l'émergence d'une pratique plus cohérente, c'est au prix d'une baisse des exigences dans la certification des équipements éligibles.

Comme ses auditions le laissent suggérer, votre rapporteur estime qu'**une centralisation du processus de décision est incontournable** pour aboutir à une cohérence nationale sur ce sujet. La refonte des tarifs et l'instauration d'un échelon intermédiaire constituent une **opportunité de fluidifier le système et de donner une réelle valeur à la notion d'intégration**, soit qu'elle privilégie les produits porteurs d'innovation, soit qu'elle fasse la part belle à l'intégration architecturale. La **certification a posteriori** des équipements, impliquant une appréciation au cas par cas des installations, a fait la preuve de son inadaptation aux enjeux de la filière. Il serait judicieux d'expérimenter maintenant une **démarche de qualification a priori**, dans laquelle les produits seraient évalués en tant que tels et labellisés une fois pour toute pour une lisibilité optimale des professionnels comme du grand public.

L'agrément des produits par l'ensemble des opérateurs concernés pourrait être obtenu à travers une **commission regroupant l'ensemble des compétences**

publiques et privées dans les domaines du bâtiment, de la maîtrise de l'énergie, de l'architecture, de l'installation. Cette instance, placée sous l'égide du Ministère de l'ÉNERGIE et du Développement durable, établirait **une liste limitative des produits éligibles au tarif d'achat le plus élevé**, les dossiers rejetés rejoignant la catégorie ouverte correspondant au niveau de **tarif intermédiaire**. La procédure réclamerait sans doute un certain délai pour qualifier les équipements, mais elle seule serait en mesure d'apprécier si la volonté de la puissance publique de favoriser les développements technologiques en matière d'intégration des systèmes photovoltaïques aux bâtiments est effectivement mise en œuvre.

Cette initiative ne présume en rien la disparition d'une **compétence de contrôle des installations sur le territoire par les pouvoirs publics**. Il ne serait pas admissible que les travaux de la commission de qualification soient vidés de leur substance par des installateurs prêts à contourner les règles ou plus simplement insuffisamment compétents pour manier les équipements les plus performants. L'existence d'un **contrôle sporadique, vouée à dissuader les velléités de fraude**, préviendrait les mauvaises pratiques sans mobiliser un nombre excessif de personnels.

B. La nécessaire réduction des délais de raccordement

Le frein à l'installation que rencontrent les particuliers et que dénoncent les installateurs locaux consiste dans les **délais excessifs qu'imposent EDF et ERDF**, l'entreprise chargée de la mission de service public de raccordement au réseau. Alors que l'attente nécessaire à la mise en service d'un système photovoltaïque prêt à fonctionner avoisinait les neuf mois, des corrections avaient été apportées pour faire passer ce délai en dessous d'**un semestre**. Votre rapporteur estime cette **performance encore grossièrement insuffisante au regard des pratiques des opérateurs de la République fédérale allemande, qui mènent à bien pareille opération en moins de six semaines**.

Il est vrai que l'emballement du marché au cours de l'année 2008 a pu surprendre et révéler un **sous-dimensionnement des services** chargés réaliser les raccordements. Plus de mille demandes parviennent à EDF tous les mois. **ERDF identifiait à la fin de l'année dernière 22 000 demandes en attente représentant une puissance de 526 MW – cinq fois le parc français actuel –** pour la seule métropole continentale. Plus de 8 000 dossiers déposés au cours du seul dernier trimestre 2008 équivalaient à 318 MW.

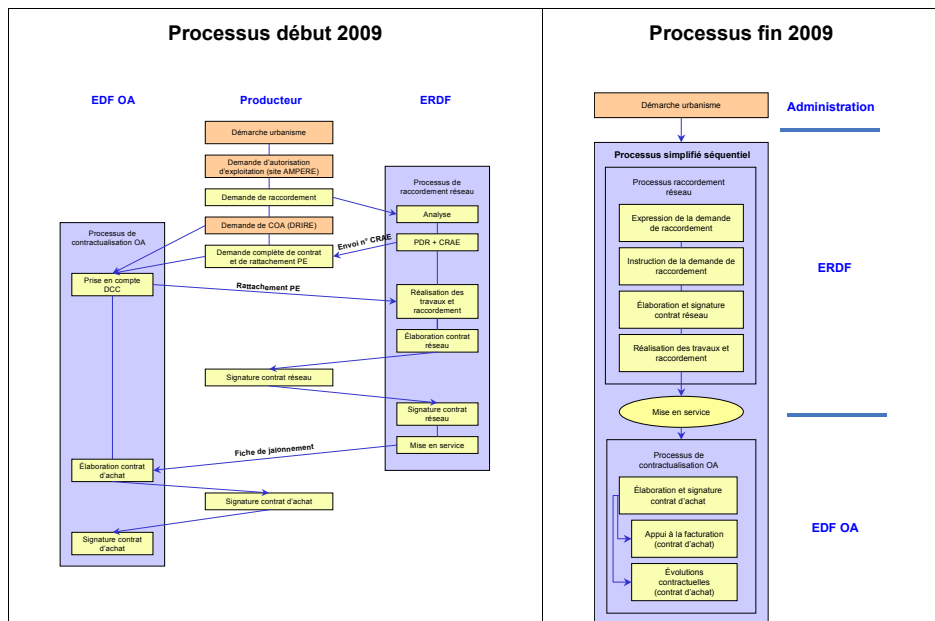
De nouvelles offres ont été définies à destination des particuliers de façon à **regrouper l'ensemble des formalités** et à accélérer les délais de traitement. Votre rapporteur se félicite de cette **tentative de rationalisation**, mais il considère qu'elle n'épuise pas la **légitime demande d'une plus grande efficacité**. Elle n'efface pas non plus les interrogations devant l'obscurité détermination de ce qui relève d'un raccordement au réseau et de ce qui constitue une extension de celui-ci – distinction qui entraîne des frais non négligeables pour l'auteur de la demande.

EDF a évoqué la possibilité d'accélérer grandement les délais en renonçant au décompte de la quantité d'électricité produite par un système dès lors que ses données de fonctionnement sont connues. La puissance installée et le lieu d'installation suffisent en effet à conjecturer l'énergie produite et par conséquent les sommes dues au bénéfice de l'obligation d'achat. **Votre rapporteur doute cependant de l'opportunité de cette évolution qui porte des effets pervers qu'il a déjà rencontrés lors de son déplacement en Espagne.** Alors que les pouvoirs publics s'avéraient également peu regardants sur la réalité de l'électricité produite avant de verser les sommes promises au titre du tarif d'achat, des opérateurs peu scrupuleux ont réclamé des subsides pour des **panneaux solaires en réalité improductifs** car défectueux, partiellement montés ou insuffisamment entretenus. Il est absolument nécessaire de prévenir la survenance de telles pratiques en France car elles jettent le **discrédit** sur l'ensemble de la filière alors que celle-ci requiert avant tout une confiance forte de la part du grand public. Le décompte de l'électricité injectée sur le réseau présente l'avantage d'un **élément factuel et opposable** dont l'impact psychologique sur la population ne saurait se voir négligé.

En revanche, un gain de temps serait obtenu si EDF renonçait à la pratique mise au jour par la commission de régulation de l'énergie d'exigence d'un **raccordement distinct dans l'optique d'un achat complet de la production.** Cette intervention ne présente aucune nécessité technique, le raccordement indirect suffit à assurer la même prestation.

Le ministre **Jean-Louis BORLOO** s'est prononcé en mai dernier sur ces délais excessifs de raccordement. Une **refonte des procédures a été annoncée pour simplifier l'opération de raccordement dans ses trois volets** administratif, matériel et contractuel. On a déjà évoqué la **suppression du certificat ouvrant droit à l'obligation d'achat** par le décret n° 2009-252 du 4 mars 2009. La **dématérialisation des procédures** permet dorénavant un traitement en ligne des dossiers et une mobilisation des ressources de l'informatique qui réduit les temps morts entre les différentes étapes. La **simplification drastique des documents d'achat et de raccordement** voit, à titre d'illustration, le contrat de raccordement ramené de cinquante à six pages. La mise en œuvre de ces dispositions a d'ores et déjà permis de **tripler le rythme de rédaction des contrats d'achat** (4 500 contrats signés au premier trimestre 2009). 4 500 installations ont été raccordées au cours du premier trimestre 2009, portant le nombre total d'installations raccordées et en service à plus de 15 000.

Votre rapporteur salue cette **batterie d'initiatives propre à développer la filière** et à satisfaire la volonté d'investissement des particuliers dans le champ de l'énergie photovoltaïque. Il appelle le gouvernement à compléter son engagement par une plus **grande fermeté à l'encontre des opérateurs qui lui semblent réclamer un temps excessif pour réaliser des branchements d'une complexité limitée**, alors même que cette activité résulte d'une mission de service public.



De nouvelles améliorations seront apportées au cadre législatif et réglementaire à l'occasion de la **discussion par le Parlement du projet de loi portant engagement national pour l'environnement, dit Grenelle 2**. Celui-ci contient une réforme importante du code de l'urbanisme, remanié dans l'objectif de faciliter l'intégration de dispositifs de production d'énergie renouvelable dans les bâtiments. Ainsi, **le permis de construire ne pourra plus s'opposer à l'installation de systèmes photovoltaïques sur les bâtiments**, hormis dans des périmètres nécessitant une protection, identifiés par l'autorité compétente en matière de plan local d'urbanisme, ou dans des zones spécifiques sauvegardées, inscrites ou classées. Cette mesure figure à l'article 4 du projet de loi.

Les pouvoirs publics ont correctement identifié les difficultés dont l'aplanissement se révélera nécessaire pour une croissance harmonieuse des capacités françaises en matière de photovoltaïque, particulièrement dans la mesure où **la stratégie nationale privilégie les installations intégrées au bâti et la production répartie**. Plus délicate à mettre en œuvre, cette option porte toutefois des avantages esthétiques, économiques et sociaux qui ont convaincu votre rapporteur de sa **pertinence** au regard de la situation de la France rapportée à celle de ses concurrents.

III.— UN CHOIX STRATÉGIQUE POUR LA FRANCE : L'INTÉGRATION AU BÂTI ET LA PRODUCTION RÉPARTIE

Eu égard aux avantages et inconvénients de chaque type d'énergie renouvelable ainsi qu'aux potentialités du territoire français, **votre rapporteur défend un engagement fort des pouvoirs publics en faveur du solaire**

photovoltaïque. Alors que les gisements hydroélectriques connaissent déjà une exploitation optimale, qu'il semble délicat d'envisager une très forte extension du parc d'éoliennes sans susciter de sourdes hostilités et que les autres productions apparaissent encore éloignées de leur pleine maturité technique, ses gains constants de rendements et la proximité du franchissement du seuil de parité réseau militent clairement dans son sens. La généralisation des panneaux solaires se présente comme une **perspective économiquement réaliste à moyen terme, socialement bien acceptée et écologiquement très positive.** La filière française peut aussi légitimement employer un argument environnemental pour développer ses capacités de production de cellules. Cette fabrication requiert une quantité importante d'énergie dont il vaut mieux pour la planète qu'elle soit française, car nucléaire et non émettrice de gaz à effet de serre, qu'allemande ou chinoise, c'est-à-dire générée à partir de gaz et de charbon.

Parmi les modalités d'exploitation de l'énergie solaire, pour tous les motifs précédemment avancés, **votre rapporteur préconise une orientation en faveur de l'intégration aux bâtiments individuels ainsi que la couverture des grandes toitures.** Les fermes solaires sont jugées incontournables à court terme, notamment en raison de leur effet d'accélération de la recherche scientifique et des percées technologiques qu'elles permettent. **La décision gouvernementale de procéder à un appel d'offre pour équiper chacune des régions françaises d'une centrale entre dans ce cadre de réflexion auquel s'ajoute une préoccupation d'aménagement du territoire. L'obligation de coupler ces fermes solaires à des capacités de stockage représentant trente minutes de fonctionnement illustre cette fonction de développement.**

Cependant, **la réflexion de votre rapporteur rejoint les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie : la production centralisée ne représente pas l'avenir.** Cette conviction acquise durant les auditions s'est renforcée au cours des déplacements effectués à l'étranger, **avec une réserve pour le solaire par concentration** qui pourrait, à terme, représenter une sérieuse option dans les latitudes où le rayonnement se montre le plus agressif.

La France a tout intérêt à privilégier un développement autour des technologies intégrées au bâti malgré le surcoût et les difficultés administratives que cette voie comporte. La prime tarifaire prévue en ce sens traduit cette stratégie. Ce choix économiquement cohérent prévient les crispations en préservant le foncier pour les activités traditionnelles, urbaines et agricoles. Il implique une adaptation du réseau qui pourrait se transcrire à long terme par une appréciable diminution des coûts. Enfin, dans le prolongement de la mission de la France dans le monde, il permettrait d'enclencher une véritable coopération avec les pays en développement.

III.1.— UN CHOIX ÉCONOMIQUE COHÉRENT

En termes strictement économiques et dans une situation concurrentielle appréhendée à l'échelle mondiale, opter en faveur de l'intégration au bâti plutôt que pour les fermes solaires et la surimposition s'impose avec évidence.

En termes d'emplois, on sait le cycle de conception des panneaux solaires très capitalistique et de surcroît propice à la mécanisation. A mesure que les chaînes de production gagnent en volume, elles exigent une moindre présence de main d'œuvre peu qualifiée. Seule la position des ingénieurs et des équipes de développement apparaît relativement sécurisée. Les gisements de travail les plus conséquents résident dans l'installation et l'entretien au domicile des particuliers ainsi que dans la commercialisation des produits qui leur sont destinés. **Selon EDF-ENR, l'installation de dix systèmes photovoltaïques équivaut à la pérennisation de 1,2 emploi au sein du bassin de vie.** A l'inverse, une centrale photovoltaïque ne réclame dans le cadre des opérations de pose qu'une main d'œuvre ponctuelle – laquelle peut d'ailleurs être appelée sur place uniquement pour l'occasion et renvoyée à la suite – tandis que l'entretien facile des équipements conçus pour durer ne mobilise qu'une poignée de techniciens pour plusieurs dizaines d'hectares.

La conception de produits qui répondent à une qualification d'intégration au bâti exige un fort investissement de la part des entreprises. Néanmoins, elle porte en elle des avantages compétitifs directs et indirects pour la filière nationale. **D'une part, les coûts plus importants que pour une simple superposition induisent un recours plus fréquent aux cellules photovoltaïques de qualité supérieure. Les productions européennes, notamment allemandes et françaises, s'en trouvent par conséquent avantagées** par rapport aux produits extérieurs à l'Union, dont les concepteurs se concentrent volontiers sur la recherche du meilleur prix au détriment des objectifs de qualité. **D'autre part, la maîtrise des nouveaux matériaux et les réalisations techniques innovantes permettent de positionner la France sur un marché de haute valeur ajoutée.** Dans la mesure où même les experts hostiles à l'intégration au bâti pour des raisons de coût admettent sa prédominance à terme sur tous les autres modes de production, mieux vaut **progresser immédiatement sur les courbes d'expérience et d'apprentissage pour capitaliser une avance technologique que le temps ne manquera pas de valoriser.** Cette approche est renforcée par l'appréciation objective du retard accusé sur les géants mondiaux dans la production de masse des équipements traditionnels, la surimposition à partir de silicium cristallin. **Plutôt que suivre la voie sur laquelle ses concurrents ont précédé l'industrie française, votre rapporteur recommande de la diriger vers un chemin de développement spécifique.** Ce n'est jamais qu'une redite de l'histoire : au cours de la seconde révolution industrielle, dominée par les capacités de production des empires britannique et allemand, la France avait judicieusement privilégié le marché du luxe et la recherche de qualité aux marchés de masse sur lesquels la quantité détermine les coûts marginaux de production et de vente. Les **tuiles photovoltaïques**, conçues et développées sur le territoire national, illustrent cette stratégie.

Enfin, l'intégration au bâti des technologies solaires entraîne des **retombées positives sur le secteur du bâtiment**. Les équipements polyvalents permettent de renouveler les matériaux employés par le secteur de la construction et de renouveler ses méthodes. Une vitre photovoltaïque, par exemple, représente un investissement pour acquérir un équipement électrique mais aussi un élément de vitrage. Cette politique pourrait donner une **avance aux professionnels français** dans la compétition, y compris dans des appels d'offres internationaux.

III.2.— PRÉVENIR LES CONFLITS D'USAGE ET LA SPÉCULATION FONCIÈRE

Le grand avantage de l'électricité solaire tient à la valorisation d'actifs existants inutilisés, qu'il s'agisse des toitures ou des terrains impropres à la poursuite d'une activité alternative. Il s'évanouit toutefois dans le **contexte d'un emballement des investisseurs devant la croissance exponentielle du marché photovoltaïque et les sauts de rentabilité financière qu'entraîne chaque avancée scientifique en termes de rendement de conversion. La tentation grandit, en ce cas, de construire à toute vitesse des infrastructures aussi puissantes que possible, autrement dit des fermes solaires géantes** sans préjudice de leur impact sur le milieu humain et naturel environnant. L'Espagne témoigne de la pertinence d'un tel scénario.

Or il ne saurait être question d'importer en France le modèle espagnol, a fortiori en concentrant dans les régions les mieux ensoleillées – donc dans lesquelles se rencontrent les volumes de production les plus élevés – des panneaux solaires à perte de vue. **La satisfaction des objectifs assignés par le Grenelle de l'environnement, soit 5 400 MW en 2020, occuperait ainsi plus de 15 000 hectares.** La culture française ne peut admettre une telle exploitation des espaces naturels au détriment tant de l'esthétique des paysages que des activités traditionnelles. Si les prix du foncier constructible le protègent d'un empiètement, les terres arables apparaissent en revanche particulièrement visées par les spéculateurs dans un contexte de crise économique qui renforce les tentations d'arrachage et de cession. **Dans le seul département des Pyrénées-orientales, ce sont près de 20 000 hectares qui ont ainsi fait l'objet de prospection.**

L'Etat doit agir pour affermir le cadre réglementaire des centrales photovoltaïques. Son action est cruciale pour **éviter un effet d'éviction** qui ne saurait générer que rancœur et contestation pour une énergie spontanément soutenue par une écrasante majorité de Français. **Les meilleures perspectives, d'un point de vue social et environnemental, se trouvent par conséquent sur les foyers des particuliers et dans les grandes toitures.** Les centrales doivent demeurer une exception rigoureusement contrôlée. Votre rapporteur recommande d'instituer une **procédure sous l'égide de l'ADEME pour agréer, voire pour présélectionner, les espaces en friche adaptés à l'accueil une installation photovoltaïque** tout en menant pendant le temps d'exploitation des équipements des opérations de reconversion et de dépollution des sites. **Un système de caution financière pourrait également dissuader la spéculation.** Le dépôt d'une

demande de construction d'un parc solaire exigerait la consignation d'une somme d'argent, laquelle serait perdue si les travaux n'avaient pas débuté passée une échéance réglementaire. L'entrepreneur n'en souffrirait pas, au contraire du spéculateur qui verrait la confiscation de la caution neutraliser la plus-value escomptée à la revente du terrain.

La préservation des terres arables ne condamne pas pour autant les agriculteurs à rester extérieurs à l'engagement national en faveur de l'énergie solaire. Votre rapporteur tient à insister sur le **rôle historique des espaces agricoles dans la production d'énergie** pour la collectivité. Hier ce furent le bois et le fourrage, rien ne s'oppose à ce que ce soit demain l'électricité issue du rayonnement du soleil. L'arrachage écarté, il reste à **investir les toits des bâtiments, hangars et autres coopératives**. L'intégration au bâti ne sera alors sans doute pas la meilleure option, notamment lorsque l'étanchéité d'un lieu n'est pas un impératif premier, et la surimposition par des panneaux ou une moquette trouve ici une justification.

Un dernier point plaide en faveur de la production répartie et du perfectionnement de cette technologie. **La France ne se limite pas à la métropole, elle inclut aussi l'outre-mer dont les problématiques énergétiques tout à fait spécifiques ont motivé l'instauration d'un tarif de base plus élevé** afin de favoriser l'édification de fermes solaires. Néanmoins, **le problème de l'espace disponible se pose avec la même acuité. EDF ambitionne l'ouverture d'une seule unité de production de 10 MWe à La Roseaie**, sur l'île de La Réunion. L'investissement des habitations particulières apparaît comme la seule réponse possible pour assurer la satisfaction des besoins en électricité des Français ultramarins.

III.3.— REPENSER LE RÉSEAU

L'irruption du photovoltaïque à grande échelle dans le bouquet énergétique français serait une véritable **révolution technique dans la gestion du réseau électrique**. Pensé pour une production centralisée, celui-ci est effectivement pour l'heure un réseau de distribution, convoyant l'électricité des centrales aux foyers de consommation. Or une habitation équipée de panneaux photovoltaïques et raccordée au réseau **est à la fois un lieu de consommation et de production**, chaque phase alternant avec l'autre tout au long de la journée.

Tant que les puissances raccordées demeurent symboliques, les maisons « énergie positive » sont facilement prises en compte par le gestionnaire de réseau chargé d'équilibrer en permanence l'offre et la demande. On estime néanmoins que **les premières difficultés apparaîtraient à compter de l'instant où le photovoltaïque représenterait 10 % de l'électricité globalement produite et que l'architecture générale du système devrait être repensée avant que ne soit atteint le seuil d'un tiers**.

Il serait alors loisible de **coupler les équipements photovoltaïques à d'autres dispositifs alternatifs**. Ceux-ci pourraient difficilement provenir de sources renouvelables, sauf à découvrir une énergie intermittente principalement dégagée pendant la nuit et les périodes nuageuses. Un complément apporté par des centrales fossiles semble difficilement défendable du point de vue environnemental. Il resterait à compter sur les progrès de la science dans les **techniques de stockage** pour emmagasiner dans chaque foyer l'énergie nécessaire à une consommation différée. Cette perfection dans l'**autoconsommation** plaiderait d'ailleurs en faveur de l'étrécissement du réseau de distribution en ne raccordant plus les habitations pour lesquelles un apport est devenu inutile. Les centrales demeureraient en fonction pour les équipements collectifs essentiellement.

Ces développements ne reposent pour l'heure que sur des conjectures. Le photovoltaïque ne bouleversera pas l'équilibre du réseau traditionnel à court ni même à moyen terme. L'occurrence d'une production d'électricité solaire supérieure à un tiers des besoins laisse suffisamment de temps pour mettre à jour les réponses scientifiques et technologiques à même de relever le défi.

III.4.— FAVORISER LA COOPÉRATION INTERNATIONALE TOUT EN VEILLANT A LA SÉCURITÉ ÉNERGÉTIQUE NATIONALE

Un dernier avantage de l'énergie photovoltaïque fréquemment mis en avant tient à sa **répartition sur l'ensemble du globe. Sans être parfaitement égalitaire, cette dernière apparaît néanmoins plus équitable que celle des hydrocarbures**. De surcroît, les pays les plus richement dotés se concentrent dans le Sud, dans les continents dont le développement économique reste à parfaire et où l'accès à l'électricité pour tous représentera un enjeu majeur du XXI^e siècle. **Il reviendra à la France, en accord avec ses valeurs universelles et dans le respect des liens qui l'unissent notamment aux nations de l'espace méditerranée et du continent africain, de contribuer au succès de cette entreprise**. La politique de la coopération comporte de longue date un volet énergétique. Le **Président de la République** a en outre mentionné ce point lorsqu'il défendit au sein de l'Union européenne le processus d'**Union pour la Méditerranée**. Les règles communautaires en matière d'énergies renouvelables autorisent en outre la réalisation des objectifs assignés hors des territoires nationaux.

Des projets ont émergé en conséquence visant à installer **d'immenses fermes photovoltaïques dans les régions les plus ensoleillées d'Afrique** pour, ensuite, **convoyer l'électricité produite vers le marché européen**. **Votre rapporteur est très dubitatif à ce qui lui apparaît comme une fausse bonne idée, source de frustrations et d'hostilités mutuelles**. Les technologies solaires permettent de sortir l'Europe de l'état de dépendance dans lequel elle se trouve envers ses partenaires commerciaux producteurs d'hydrocarbures. **Comment envisager que, par la localisation au-delà des frontières européennes de capacités essentielles de production, cette dépendance se trouve**

artificiellement restaurée au bénéfice d'Etats étrangers ? De plus, comment défendre au regard de la morale le rapatriement de l'électricité produite alors que les populations locales en sont dans leur grande majorité cruellement dépourvues ?

La véritable coopération ne peut prendre cette forme. Au reste, la France manquerait de compétence comme de légitimité pour l'orchestrer si elle réduisait au strict nécessaire son investissement dans les parcs solaires. Au contraire, elle doit **défendre une approche fondée sur la voie technologique qu'elle privilégie, seule à même de profiter à l'ensemble des populations du Sud**. Sans préjudice d'un raccordement au réseau rendu délicat par un maillage restreint, l'équipement d'habitats individuels fonctionnant selon le principe de **l'autoconsommation** ouvrirait l'accès à l'énergie plus sûrement que des centrales géantes vouées à approvisionner les besoins européens.

Le rôle de l'Etat, fondamental, apparaît désormais avec précision dans le soutien et l'orientation de la demande en énergie photovoltaïque. Si les attentes du grand public ne se démentent pas plus en France qu'à l'étranger, le marché devrait poursuivre sa croissance exponentielle. **La constitution d'une solide filière française dépend cependant d'autres paramètres : une recherche performante, une industrie efficace, des craintes face à la nouveauté dissipées.**

CHAPITRE III : STRUCTURER UNE FILIÈRE FRANÇAISE PHOTOVOLTAÏQUE

Les dispositifs de soutien de l'Etat au bénéfice de l'équipement des foyers en panneaux solaires précédemment décrits ne contribuent que partiellement au dynamisme de la filière photovoltaïque française. L'émergence d'un marché intérieur porté par une demande forte constitue une étape essentielle en assurant la présence sur le territoire d'un réseau dense de professionnels dans l'aval du secteur. Ainsi, déjà aujourd'hui, **le nombre d'installateurs de systèmes ne manque pas parmi les artisans, même si leur formation nécessitera un regard plus exigeant** de la part des pouvoirs publics.

L'énergie solaire satisfait les ambitions de la France dans la lutte contre le changement climatique et la réduction de la contrainte extérieure dès qu'elle représente une puissance installée significative. Le décollage économique de la filière exige plus. L'exemple allemand, ici encore, le prouve. Le pays s'est hissé au premier rang de la compétition mondiale grâce à une **synergie avancée entre les équipes de recherche d'une part et les entrepreneurs d'autre part**, tandis que République fédérale coordonnait les efforts et apaisait les réticences par une réglementation précise et protectrice.

La France, dans ce secteur comme dans beaucoup d'autres, n'a pas à rougir des performances de ses chercheurs ni de l'investissement public dans leurs activités, bien que votre rapporteur espère voir encore s'accroître prochainement l'effort engagé. Les équipes scientifiques recueillent des résultats innovants, prometteurs, remarquables. Le bât blesse essentiellement dans la **composante industrielle de la filière** et dans la **transformation des données établies en laboratoire vers des applications intégrées à la chaîne de montage des usines**. Les opérateurs nationaux ne maîtrisent que partiellement le cycle du silicium et accusent par conséquent, en amont et en milieu de cycle, une **dépendance à l'égard des approvisionnements de partenaires étrangers**. L'**absence de synergie industrielle** pénalise à son tour la recherche-développement, creusant le retard français dans la bataille de la production et des rendements.

La construction et le parachèvement de la filière photovoltaïque française représentent un **défi à relever pour la nation française**, pour ses collectivités publiques comme pour ses forces vives économiques. Le secteur de l'énergie revêt pour sa part une incidence stratégique dans la bonne marche de la société française. **Votre rapporteur suggère par conséquent que la recherche d'une position forte dans la compétition mondiale soit élevée au rang de priorité.** Le secteur bénéficierait alors, au-delà des fonds démonstrateurs déjà actifs et des crédits orientés vers la restructuration industrielle, des outils mis en œuvre récemment dans le cadre du plan de relance, à l'initiative du Président de la République, pour renforcer les axes de compétitivité de l'économie.

Le Fonds stratégique d'investissement (FSI), dont les dotations annoncées il y a peu ont porté les moyens à vingt milliards d'euros, semble à même de renforcer considérablement les jeunes entreprises innovantes du marché photovoltaïque et d'éviter leur prise de contrôle par des capitaux étrangers, événement que connut le fleuron français de la précédente décennie, Photowatt. Parmi les personnes auditionnées, certaines ont souhaité une plus grande implication du FSI dans le devenir des projets industriels. Il reste à souligner que la mission confiée à ce nouvel intervenant concerne le paysage industriel courant et non les initiatives encore à l'état de projet. **Le FSI n'est pas Oséo.**

Comment, alors, assurer le financement des projets français dont la pertinence ne soulève aucun doute mais que la crise financière ajourne *sine die*, faute d'investisseurs capables de réunir les fonds nécessaires ? **Votre rapporteur propose d'affecter à ces situations une fraction des sommes levées par l'intermédiaire du grand emprunt national dont les modalités et les affectations restent à définir. La perspective d'un secteur photovoltaïque fort et des dizaines de milliers d'emplois qu'il suppose suffit à expliquer ses motivations.** Le grand emprunt doit accélérer l'innovation dans le pays, et l'énergie solaire porte sans contestation possible une partie de la réponse aux problématiques profondes de la planète. Elle bénéficie enfin, il faut le rappeler, d'un enthousiasme massif de la part de la population, propre à valoriser les souscriptions recueillies.

I.— UNE RECHERCHE FRANÇAISE PERFORMANTE

La recherche publique française sur les énergies jouit d'un statut prioritaire dans la répartition des enveloppes budgétaires. A titre de comparaison, **la France a consacré durant le précédent exercice comptable un montant de 800 millions d'euros à ses investigations contre seulement 450 millions pour la République fédérale allemande** – où il faut certes concéder une contribution significative du secteur privé et l'absence d'appel de fonds par la filière nucléaire.

En ce qui concerne le seul photovoltaïque, et en prélude à la description du système de recherche français, votre rapporteur réitère sa **recommandation de ne négliger aucune voie technologique**. Les couches minces représentent l'avenir, mais le présent reste acquis aux techniques du silicium qui présentent de surcroît un réel potentiel d'amélioration. L'avance prise en la matière par la concurrence étrangère peut être rattrapée à condition de livrer une rude bataille sur le terrain des capacités de production et des effets d'échelle qu'elles induisent. A défaut, il reste possible de se positionner sur le marché émergent des couches minces. Les cellules polymères de troisième génération n'effectueront que dans un avenir lointain leur passage du laboratoire de recherche aux applications industrielles.

Trois pôles de compétitivité nationaux mis en place en 2005 (*Derbi* en Roussillon, *Capénergies* en Provence et *Tenerrdis* dans la région Rhône-Alpes) rassemblent plus de 40 centres de recherche, 30 centres de formation et 150 entreprises autour des thématiques du solaire en lien avec la maîtrise de l'énergie

dans les bâtiments. Le **pôle S2E2** (*Sciences et Systèmes de l'ÉNERGIE Electrique*) s'intéresse également au photovoltaïque. C'est au sein de ces pôles que l'Etat soutient activement la recherche dans le domaine du photovoltaïque.

Projets de recherche des trois pôles de compétitivité Tenerrdis, Derbi et Capénergies

1/ Concepts innovants

- CSPV : système adaptatif de concentration solaire destiné au photovoltaïque *Polymage / Capénergies*
- Nanorgysol : nouvelles structures de cellules photovoltaïques intégrant des nanocomposites *CEA / Tenerrdis*
- Phare : procédé innovant pour cellules photovoltaïques en silicium à haut rendement *CEA / Tenerrdis*
- QCPassi : développement de nouvelles structures de silicium à hétérojonction et structure interdigitée *CEA / Tenerrdis*
- THRI-PV : très hauts rendements et innovations photovoltaïques *IRDEP CNRS / Derbi*

2/ Fabrication

- Dopage type P : recyclage et réduction de quantité de silicium dans la fabrication des cellules photovoltaïques *Semco / Derbi*
- Fluxeo : faisabilité industrielle de panneaux solaires photovoltaïques intégrant un film intelligent *Groupe Verre Catalan / Derbi*
- REDUCOP 2 : réduction des coûts de production des modules photovoltaïques par innovation sur les différentes étapes de la chaîne de montage *Photowatt / Tenerrdis*
- Roll PV : mise en place d'une ligne pilote de production continue de modules photovoltaïques par calandrage et optimisation. Etude de la recyclabilité de ces panneaux *Sun Land 21 / Tenerrdis*
- Siclades : protection des creusets graphite pour la production de silicium de qualité photovoltaïque à partir de silicium métallurgique *CEA / Tenerrdis*
- Twin : purification du silicium en four à creuset froid et tirage continu *EMIX / Tenerrdis*

3/ Intégration et système

- Inpasol-b : intégration des parois solaires *LAM II / Capénergies*
- Modules LiPV : adaptation de la technologie du stockage Li-Ion aux systèmes photovoltaïques *CEA / Tenerrdis*
- Multisol : architecture globale avec gestion intelligente des charges *Schneider Electric & CEA / Tenerrdis & Capénergies*
- Quali'Vapeur : valorisation de l'électricité produite à partir de modules photovoltaïques *Apex BP Solar / Derbi*
- Recherche collective PV : développement de l'utilisation du photovoltaïque pour alimenter des appareils de traitement de l'eau ou de transformation de produits agroalimentaires *Cirad, Femag Industries / Derbi*
- Solution-PV-Sol PV1 : développement d'une offre combinant modules photovoltaïques, fonctions de conversion, stockage et raccordement au réseau, fonctions de supervision et nouveaux services *Schneider Electric / Tenerrdis*
- Toit PV/TH : capteurs hybrides photovoltaïques et thermiques pour couverture métallique multifonctionnelle *Sun Land 21 / Tenerrdis*

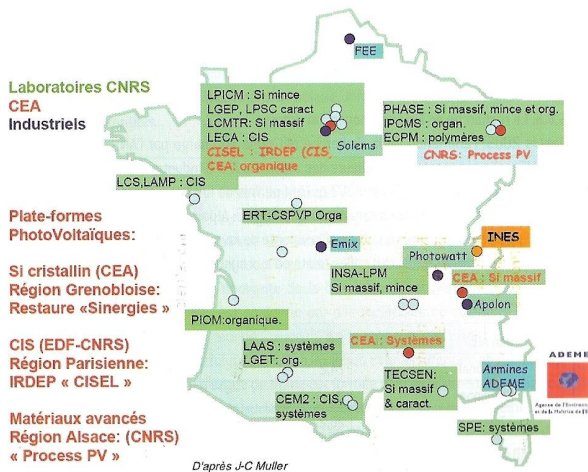
4/ Caractérisation et comportement

- Centre d'essais solaire : conception et construction d'un banc de tests en vue de certification *Cartech UPVD / Derbi*
- DUREE : durabilité des équipements énergétiques et des composants enveloppes du bâtiment *CSTB / Tenerrdis*
- PSPV : performances des modules photovoltaïques *CEA / Capénergies*

I.1.— DES CENTRES DE RECHERCHES RENOMMES AUX BUDGETS ET AUX TRAVAUX CONVAINCANTS

En matière solaire, la France s'appuie sur des **fleurons scientifiques** pour mener à bien les recherches qui permettront les percées technologiques de demain. On évoquera l'**INES de Chambéry** qui concentre ses recherches dans le domaine photovoltaïque sur la filière silicium et l'**IRDEP de Chatou**, référence sur le thème des couches minces élaborées à partir d'indium.

On n'occultera cependant pas les plus petites structures, moins renommées, qui conduisent leurs investigations dans les universités et les laboratoires du CNRS, et qui recueillent également de bons résultats à partir de moyens bien moindres. Leur présence est indispensable, notamment sur les filières en émergence (couches minces, matériaux organiques et nanostructures) avec des rendements de cellules parmi les meilleurs au monde.



Les principaux acteurs de la recherche française

Ces équipes fonctionnent avec des crédits toujours ressentis comme insuffisants et dont le renforcement génèrerait sans doute une progression notable dans les résultats obtenus. Les subventions directes se mêlent aux financements distribués par les agences et aux sommes libérées par la récente instauration du crédit d'impôt recherche.

A. L'INES et la filière silicium

L'Institut national pour l'énergie solaire (INES), créé en 2006 dans le département de Savoie à l'initiative des pouvoirs publics avec des équipes du CEA, du CNRS, de l'université de Savoie et du CSTB, est aujourd'hui le centre d'excellence français dans la recherche solaire au niveau national et

international. Installé sur plus de dix mille mètres carrés, l'INES figure parmi les trois ou quatre pôles de recherche les plus importants au monde. Il contribue au **développement** et à l'**innovation industrielle** en France pour l'utilisation de l'énergie solaire, particulièrement au service de la **maîtrise de l'énergie dans le bâtiment**. Le photovoltaïque entre dans ses domaines d'investigation au côté du solaire thermique ou encore de l'économie des réseaux.

L'INES traduit l'engagement massif dans les technologies solaires d'un acteur majeur de la recherche française, le **Commissariat à l'énergie atomique**. Sur les quelque cent cinquante chercheurs que compte l'institut, cent vingt proviennent du CEA. Ce nombre devrait encore augmenter d'une cinquantaine d'unités dans les mois à venir. **La structure est crédibilisée par son budget conséquent, de soixante-quinze millions d'euros** à la fin de l'année 2008 et en augmentation constante.

L'INES connaît une **performance remarquable** dans ses travaux scientifiques. Lors de sa visite des installations, votre rapporteur a par exemple observé la réalisation en cours de cellules offrant un **rendement de 17 %**. Plus intéressant encore dans une optique de formation de la filière industrielle française, les chercheurs ont conclu des **partenariats** avec des opérateurs industriels, en grande majorité issus de la région Rhône-Alpes. Des **transferts technologiques** sont en cours à destination des entreprises qui font à leur tour appel à l'INES pour expérimenter de nouvelles techniques et procédures.

Le rôle joué par les collectivités locales dans cette réussite scientifique aboutissant à l'édification d'un pôle d'excellence à l'échelle mondiale doit être salué et susciter, en creux, une interrogation. **Votre rapporteur se félicite de l'investissement fort des élus locaux**, notamment du conseil général de Savoie, dans la naissance de l'institut alors que le département ne paraissait en rien prédestiné pour explorer ce domaine de recherche. Il est probable que, en l'absence des subventions octroyées par les collectivités, l'ensemble n'aurait pu voir le jour. **On ne peut que regretter le faible soutien apporté dès l'origine par l'Etat, hormis par l'entremise de l'Agence nationale de la Recherche – laquelle a tout de même fourni par ses contrats près des deux tiers du budget initial.** La conquête de l'énergie solaire ne saurait, à l'avenir, s'organiser hors la présence étatique.

L'INES jouit enfin d'une visibilité internationale qui place la recherche française dans une position appréciable dans le monde. Quoiqu'il ait été surpris par l'absence de coopérations poussées lorsqu'il a auditionné des chercheurs spécialisés dans le photovoltaïque lors de ses déplacements à **Madrid et Berlin**, votre rapporteur a constaté avec satisfaction que tous connaissaient la recherche hexagonale et estimaient ses résultats. Ce succès en appelle d'autres. Les équipes françaises détiennent les qualités requises pour donner l'avantage à la filière industrielle nationale.

B. L'IRDEP de Chatou et les couches minces CIS

Votre rapporteur a rencontré le professeur Daniel LINCOT pour parfaire sa connaissance en matière de **couches minces**. L'unité qu'il dirige, **l'Institut de Recherche et Développement sur l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP)**, fait en effet référence dans ce domaine, plus précisément dans les recherches sur la technologie de cuivre indium.

L'IRDEP est un **institut mixte entre EDF, le CNRS et l'école nationale supérieure de chimie de Paris**. Centre de recherche d'excellence attractif pour les chercheurs, il bénéficie de la **présence d'EDF en son sein pour faciliter la remontée des découvertes vers les exploitations industrielles**. Pendant de l'INES pour les couches minces, il bénéficie également d'une renommée internationale.

C. Les petites équipes

Votre rapporteur n'a pas souhaité rencontrer uniquement les porte-parole des fleurons de la recherche nationale. Des visites ont été réalisées dans les locaux de **l'Université de Perpignan** et de **l'Institut des matériaux de Nantes**. Les chercheurs y conduisent également des recherches de grand intérêt. Le premier site observé a même permis de retrouver par hasard un représentant de l'INES venu s'enquérir des progrès réalisés. Dans le second votre rapporteur a mesuré une compétence que le monde peut nous envier et une réelle volonté de développement industriel.

Le constat d'une **pénurie de moyens** s'impose rapidement malgré la qualité des travaux exposés et leurs perspectives commerciales, parfois déjà concrétisées par la création d'une société commerciale en devenir. **Les équipes de recherche publique regroupent des effectifs réduits**, qui dimensionnent la capacité de recherche nationale. Sur chaque filière, il n'existe qu'une à deux équipes, reposant chacune sur deux à trois chercheurs permanents. Ainsi, **alors que les thèses françaises sur la technologie du CIGS se comptent chaque année sur les doigts d'une main, plus de cinquante sont dans le même temps soutenues en République fédérale allemande**. Le dévouement et la qualité des hommes ne peuvent indéfiniment pallier une carence numérique et financière. **Une amélioration des conditions de recherche permettra de maintenir la France au rang qui doit être le sien**. Une formule entendue lors d'une audition retrace cette logique : on ne développe pas un programme d'élite uniquement avec des stagiaires.

1.2.— UN ENGAGEMENT IMPORTANT DE L'ANR

L'année 2005 a constitué un tournant dans le soutien de la recherche-développement photovoltaïque, avec la **mise en place dès la création de l'ANR d'un programme de recherche, qui a fortement accru ses moyens**. Depuis 2005, elle accorde **en moyenne 8,5 millions d'euros annuels d'aide à des projets photovoltaïques** (dix à douze dossiers par an représentant un budget total

de vingt-quatre millions d'euros), pour développer des filières émergentes et pour favoriser le partenariat public/privé. **Un quart à un tiers des sollicitations présentées sont retenues**, ce qui représente une proportion légèrement supérieure à l'ensemble des projets toutes disciplines confondues, pour un **coût unitaire moyen s'établissant à 800 000€**. Le défi de l'avenir consistera à continuer à sélectionner les dossiers les plus prometteurs alors que le décollage économique du secteur devrait multiplier à court terme le nombre de candidats.

	2002	2003	2004	2005	2006
Total ENR	28,4	25,4	30,7	42,6	52,4
dont photovoltaïque	15	9,4	13,8	21,4	24,2
dont ANR PV	-	-	-	9,6	9,5

Financement public national à la recherche sur les énergies renouvelables (en millions d'euros, source ANR)

Cette croissance des budgets de recherche a permis de rejoindre le peloton de tête des pays qui consacrent d'importants crédits à l'exploration de l'effet photovoltaïque, en restant **toutefois encore loin de l'Allemagne et des Etats-Unis**. Il faut corriger dans le tableau suivant la faiblesse du chiffre français, celui-ci ne mentionnant pas la contribution de vingt millions d'euros versée par le CEA.

Etats-Unis	101
Allemagne	44,5
Japon (<i>METI</i>)	28,4
Corée	13,4
Grande-Bretagne	11,1
France (<i>ADEME+ANR uniquement</i>)	9
Italie	5
Norvège	4,6
Australie	4,5
Canada	3,8

Budgets publics de R&D en 2007 (en millions d'euros, source ANR)

La part de l'ANR dans les budgets de recherche du domaine est très importante, s'élevant quasiment à 40 % des financements publics. Elle détermine fortement l'orientation des travaux du secteur public.

De plus, comme les projets de recherche soutenus par l'ANR sur les filières du silicium cristallin et des couches minces prennent la **forme juridique d'un partenariat public privé**, elle influe également sur la recherche privée et favorise les liens et les transferts de technologie entre public et privé. Ainsi, **entre 2005 et 2007, cinquante-quatre équipes de recherche du privé ont été soutenues** à travers des projets ANR. Les entreprises privées, principalement les **grands groupes** (EDF, Total, Saint-Gobain, Imphy Alloys), **reçoivent 26 % des fonds consacrés par l'ANR** à ces projets.

Les petites et moyennes entreprises ne reçoivent que 6 % de cette aide mais elle reste souvent déterminante pour le démarrage ou le renforcement d'une activité en photovoltaïque. Le cas d'EMIX, producteur de lingots par la technique innovante de la coulée continue, est emblématique de ce dernier point. **L'ANR, cependant, a vocation à soutenir la recherche et non à abonder les crédits d'Oséo** dans le domaine de l'innovation industrielle.

Les objectifs poursuivis en matière de recherche sur les technologies photovoltaïques se déclinent en trois volets. Il s'agit d'abord de réduire autant que possible le coût de production du wattheure photovoltaïque pour améliorer la rentabilité économique des systèmes. Il faut ensuite favoriser le développement de solutions pour l'existant. Enfin, la prospective s'attache à préparer la période qui verra les mécanismes de marché prendre le relais des tarifs d'achat réglementaires. **L'exploration de techniques de stockage et de gestion intelligente de l'énergie forme avec la gestion de réseau l'essentiel de ces investigations.**

Projets de recherche financés en 2008 par l'ANR

- ASYSCOL : approche systémique de cellules solaires à colorant à base d'oxyde de zinc
- INFIME : ingénierie de face arrière pour l'amélioration et la mise en modules de cellules photovoltaïques ultraminces en silicium
- RTUSolarCrucible : creusets solaires prêts à l'emploi
- SIFLEX : cellules photovoltaïques en silicium sur substrat flexible
- SOLHYPIN : cellules solaires hybrides transparentes et durables
- SPIR-WIND : développement de cellules photovoltaïques organiques à longue durée de vie et à absorption élargie dans l'infrarouge pour les fenêtres solaires
- ULTRACIS : cellules solaires à haut rendement à base de couches ultrafines de CIS
- VISTASOLAR : stratégie pour améliorer la stabilité des cellules photovoltaïques organiques incluses dans du double vitrage
- NewPVonGlass : nitrures déposés sur verre pour un watt photovoltaïque intégré à l'habitat à bas coût et à très haut rendement
- INXILICIUM : capteurs photovoltaïques de silicium amorphe imprimés en couches minces par jet d'encre

Dans le cadre de sa programmation 2008-2010, l'ANR a décidé de lancer un **nouveau programme intitulé HABISOL**, qui regroupe des thèmes de recherche sur le bâtiment (anciennement *Briques technologiques*) et sur le solaire (anciennement *Solaire photovoltaïque*). Il mobilise la communauté scientifique et les industriels du secteur pour répondre aux **enjeux très ambitieux d'économies d'énergie dans le bâtiment** autour de trois approches complémentaires. En premier lieu, l'intégration de solutions technologiques globales permet d'économiser l'énergie et d'utiliser les énergies renouvelables tout en garantissant le confort d'usage, la sécurité et la santé des utilisateurs. Dans cette optique, le programme encourage des travaux en domotique pour la gestion des énergies ainsi

que des projets pluridisciplinaires qui prennent en considération les aspects de fiabilité, d'acceptabilité, d'analyse des coûts, d'adaptation aux usages et aux comportements, de facilité de mise en œuvre et de maintenance. En second lieu, le développement des solutions technologiques-clé réduit radicalement les consommations d'énergie dans le neuf et l'existant, tout en respectant le recyclage des matériaux utilisés et en évitant l'usage de produits qui seront interdits dans les futures réglementations – notamment les transpositions de la directive communautaire REACH. Enfin, **les technologies photovoltaïques complètent l'édifice dans une approche de production d'énergie au niveau même des bâtiments.**

Le programme HABISOL est la contribution de l'ANR au **programme interministériel PREBAT** (programme de recherche sur l'énergie dans le bâtiment).

I.3.— DE LA RECHERCHE A L'APPLICATION

Les prestations remarquables des équipes de recherche françaises devraient placer la filière industrielle nationale dans de bonnes conditions pour affronter la concurrence sur le marché mondial. Néanmoins, ainsi que votre rapporteur l'a fréquemment entendu au cours de ses auditions préparatoires, **il reste à jeter des ponts solides entre les programmes de recherche et les développements industriels.** Trop de découvertes scientifiques s'achèvent en publications plutôt qu'en brevets, lorsque les performances n'attirent pas l'attention des opérateurs japonais et allemands prompts à monter au capital de jeunes entreprises innovantes ou, le cas échéant, à s'assurer par contrat une part déterminante de leur production.

Cette lacune est en cours de correction. **Les partenariats industriels de l'INES ont par exemple quintuplé au cours de ses quatre années de fonctionnement,** et 95 % d'entre eux émanent de l'hexagone – dont près des deux tiers de la seule région Rhône-Alpes. Elle a été relevée par les observateurs, secteurs public et privé confondus, qui ont engagé une action commune pour la résorber par le projet *Solar Nano Crystal*. Elle a également fait l'objet d'un **engagement du Centre scientifique et technique du bâtiment** afin de communiquer plus rapidement au monde de la construction les innovations de la filière photovoltaïque intégrées au bâti.

A. Solar Nano Crystal, du laboratoire à la chaîne de montage

Le programme *Solar Nano Crystal* prend appui sur le **pôle de compétitivité Tenerrdis**. Il poursuit l'ambition de doter la France d'une filière industrielle autonome complétée, ce qui est un aspect fondamental aux yeux de votre rapporteur, de capacités de recherche et développement reconnues pour leurs compétences en matière de transferts technologiques vers l'industrie.

La Commission européenne a autorisé, le 20 février 2009, une **aide d’OSEO (ex AII) de 46,5 millions d’euros** à l’appui de l’initiative, décomposée en 21,5 millions d’euros de subventions et 25 millions d’euros d’avances remboursables dans le cadre du programme « Innovation stratégique industrielle » d’OSEO. **Le budget total des engagements se monte à 190 millions d’euros. Les collectivités se sont investies pour un peu moins du dixième de la somme.**

Lancé sur cinq ans (2008-2012), il a pour **objectif d’abaisser significativement le prix de revient de l’énergie photovoltaïque, grâce d’une part à des innovations de rupture en termes de rendement ainsi que dans l’approvisionnement de l’industrie en silicium et d’autre part, à leur validation sur une unité pilote de démonstration appelée *LabFab***. La présence de nombreux acteurs économiques, scientifiques et technologiques du secteur crée une synergie appréciable. Emix, Photosil, Silicium de Provence (Silpro), Apollon Solar se voient rejoints par les équipes de chercheurs du CEA, du CNRS, de l’université de Savoie et du CSTB que fédère l’INES.

L’expérimentation des résultats de la recherche verra **l’édification d’une centrale photovoltaïque d’échelle réduite sur le site du CEA à Bourgoin-Jallieu**, dans l’Isère. La tête de file du projet a été confiée à l’entreprise **PV Alliance qui réunit dans son actionnariat EDF EN et Photowatt (40 % chacun) avec une participation du CEA à hauteur de 20 %**. Elle devrait être à même de procéder à l’utilisation optimale des résultats recueillis pour l’amélioration des procédés de production.

B. Le PASS Innovation du CSTB

Dès lors que la France se positionne prioritairement sur le segment de marché que représentent les équipements intégrés au bâtiment, des liens constants doivent s’établir entre les professionnels de la construction et les opérateurs de l’énergie solaire. Les produits novateurs, porteurs d’une technologie nouvelle, entraînent un changement dans les habitudes d’utilisation et des réserves de la part des utilisateurs plus à l’aise avec des matériaux reconnus. **Le centre scientifique et technique du bâtiment détient la grande responsabilité de certifier conformes à la réglementation en vigueur les innovations développées par la filière photovoltaïque**, entraînant l’intégration par la filière et la couverture des sinistres par les compagnies d’assurance.

La qualification d’un produit innovant par le CSTB prend normalement la forme d’un avis technique, procédure lourde et exhaustive qui nécessite un délai conséquent de **dix-huit mois**. Dans un secteur aussi dynamique et mouvant que le photovoltaïque, retarder d’un an et demi l’apparition sur le marché de l’innovation revient simplement à la vider de sa substance. Le faible nombre de sollicitations qui lui étaient parvenues par cette voie, inversement proportionnel aux critiques émises par les opérateurs de la filière, a conduit le CSTB à proposer une **expertise plus légère à travers le *PASS Innovation***. **Délivré en trois mois seulement** et bénéficiant d’une pleine reconnaissance des

assureurs malgré un examen moins approfondi, il apparaît nettement plus adapté à la volatilité du marché. Opérationnelle depuis un an, la procédure a vu la validation d'une dizaine de produits.

Les critères de performance appliqués à un équipement photovoltaïque voué à s'intégrer au bâti sont de deux ordres. **Parce qu'il est un élément électrique, il doit remplir sa fonction de production d'énergie en toute sécurité dans le respect des normes en vigueur en matière de sécurité électrique. Et comme il est aussi un élément de la construction, son caractère fiable et pérenne ne doit susciter aucun doute.** Sa durabilité, sa résistance aux intempéries, son étanchéité sont autant d'aspects rigoureusement évalués et pour lesquels une défaillance technique est rapidement jugée rédhitoire. **Ces qualités ne sont pas exigées pour les équipements solaires surimposés** puisque l'habitat destinataire est déjà, par hypothèse, considéré comme parfait, clos et couvert. Les coûts de développement de l'intégration au bâti augmentent en même temps que le temps d'attente obligatoire avant la mise à disposition des professionnels et du grand public.

Votre rapporteur se félicite de la leçon tirée par le CSTB de l'inadaptation de sa procédure de traitement traditionnelle pour les équipements nantis de technologies photovoltaïques. Il souligne toutefois l'importance de la poursuite des efforts engagés pour réduire au maximum les délais de traitement et permettre aux produits intégrés au bâti, véritable spécificité de la filière française, d'être proposés aux acquéreurs dans des conditions aussi similaires que possibles à celles des concurrents spécialisés dans la surimposition.

II.— DES CAPACITÉS INDUSTRIELLES ENCORE LIMITÉES

La constitution d'une filière industrielle française nécessite une performance élevée des équipes de recherche et de bonnes capacités de transferts de l'innovation du laboratoire vers les applications commerciales. Encore faut-il cependant que l'industrie soit à même de recueillir ces fruits et de les valoriser sur le marché national et mondial.

La France se trouve dans la désagréable position de l'inventeur dont les notes et les découvertes profitent à d'autres, faute d'avoir été à même de capitaliser sur ses premières découvertes et sur l'avance technologique autrefois détenue. Les capacités de productions accusent un retard comparable à celui des puissances installées. L'absence d'acteur de poids à chacune des étapes du cycle du silicium rend en outre les opérateurs tributaires d'approvisionnements étrangers, ce qui limite les synergies de recherche et les développements nés des retours d'expérience. Comblar les carences dans l'échelle de production apparaît délicat, alors que la crise financière internationale complique à l'extrême la constitution des tours de table. **C'est donc encore une fois à la puissance publique de mettre en œuvre des incitations, voire d'intervenir directement dans ce secteur grandement stratégique.**

II.1.— LE GLORIEUX PASSÉ FRANÇAIS

La France peut se prévaloir dans l'industrie photovoltaïque de la même antériorité que celle dont elle jouit dans la recherche. Comme **BECQUEREL** fut à l'origine des investigations scientifiques sur la conversion du rayonnement solaire en électricité, c'est un groupe hexagonal qui a longtemps occupé le premier rang dans la compétition mondiale. **Photowatt** a été fondée en 1979, au départ en tant qu'organisme de recherche dans le domaine des technologies photovoltaïques. Installée d'abord à **Caen** (Normandie), la société a déménagé à **Bourgoin-Jallieu** (Isère) en 1990 pour s'agrandir et se rapprocher des industriels des semi-conducteurs et des centres de recherche de Lyon et de Grenoble.

Quoique performante et innovante, Photowatt est restée jusqu'en 1996 une petite entreprise de moins de cent personnes, avec une capacité de production de l'ordre de trois mégawatts. Elle occupait néanmoins alors une position majeure dans le secteur avant la généralisation des raccordements au réseau. **Son rachat par la société canadienne ATS en 1997 a permis de lever les capitaux nécessaires à une hausse de la capacité de production, portée à 13 MW entre 1997 et 2000.** En 2001, Photowatt s'est dotée d'une ligne d'assemblage des modules. La société conçoit des systèmes de génération photovoltaïques sur réseau et hors réseau. **Elle emploie aujourd'hui 700 personnes pour une production annuelle de 60 MW.**

Néanmoins, **l'explosion du photovoltaïque au Japon et en Allemagne a confronté à une rude concurrence la société désormais reléguée loin dans la hiérarchie mondiale des producteurs.** La faiblesse de l'industrie électronique française, génératrice des résidus de silicium purifié sur lesquels les opérateurs nippons ont pu prendre appui, et l'absence des aides massives dont bénéficiaient les concurrents allemands n'ont pas permis de conserver l'avance technologique acquise. **C'est d'autant plus regrettable que Photowatt est un des rares opérateurs intégrés du marché, c'est-à-dire capable de couvrir la quasi-totalité du cycle du silicium** à l'exception de la purification du matériau primaire. La flambée des cours des matières premières l'a même conduit à adapter son processus industriel pour un recours à un **silicium dégradé, de qualité simplement métallurgique**, sans que le rendement des cellules produites n'en pâtisse exagérément. **Les autres industriels présents sur le marché français ont jugé plus opportun de se spécialiser** dans une étape particulière du cycle.

II.2.— UN RETARD DÉSORMAIS PATENT DANS LES CAPACITÉS DE PRODUCTION

La présence française sur le marché mondial apparaît à l'heure actuelle plus que limitée en termes de volume de production. S'il présente une réalité qui a déjà fait l'objet de profondes mutations, le tableau suivant fait apparaître un réel retard qui s'est depuis encore creusé avec l'émergence de la **Chine** et de la **Corée du Sud** comme concurrents sérieux et crédibles.

PRODUCTION DE MATÉRIAUX, CELLULES ET MODULES PHOTOVOLTAÏQUES EN 2007

	Production de silicium (tonnes)	Production de lingots et de plaquettes (MW)	Production de cellules (MW)	Production de panneaux en Si cristallin (MW)	Production de panneaux en couches minces (MW)
Australie	-	-	36	9	-
Autriche	-	-		47	
Allemagne	8 000	415	842	875	94
Espagne	-	-	> 120	> 400	
France	-	88	40	50	< 1
Grande-Bretagne	-	190	< 2	129	< 2
Italie	-	-	13	72	-
Japon	1 391	670	923	>> 350	89
Corée	-	11	25	53	-
Norvège	-	503	135	-	-
Etats-Unis	5 100	142	266	89	177
Total	14 500	2 140	> 2400	> 2150	365

On constate avec intérêt que **seuls trois pays détiennent une position significative dans chacune des étapes du processus conduisant de la purification du matériau à l'assemblage des panneaux solaires**. Le Japon et l'Allemagne luttent pour une suprématie dans la filière silicium. **Les Etats-Unis représentent un cas atypique puisque le pays mise prioritairement sur le développement des couches minces** : déjà en 2007 alors que ces technologies faisaient leur apparition, elles représentaient les deux tiers des panneaux assemblés en termes de puissance. La percée commerciale opérée par le tellure de cadmium du fait de son rapport coût/rendement a renforcé cette orientation.

Les performances françaises révèlent, sinon une présence symbolique, du moins de **larges potentiels d'expansion**. Absente de la première phase du cycle et vouée à solliciter l'Allemagne pour son approvisionnement en silicium, **la France ne participait en 2007 qu'à hauteur de 4 % à la production globale de lingots et de plaquettes, de 1,6 % à la fabrication de cellules et de 2,3 % à l'assemblage de panneaux**. Par comparaison, la République fédérale allemande s'adjudge des taux respectifs de 19 %, 35 % et 40 %. **En ce qui concerne les couches minces**, considérant le choix jugé pertinent de rester à l'écart de la filière CdTe, **les positions restent encore à conquérir**.

La capacité de production de cellules photovoltaïques devrait atteindre 86 MW en 2009, et la capacité de production de modules passer de 56 MW en 2006 à 190 MW en 2009 puis 330 MW en 2010. Ainsi, environ la moitié des modules installés en 2008 en France ont été produits à l'intérieur des frontières nationales (55 MW sur un marché estimé à 105 MW).

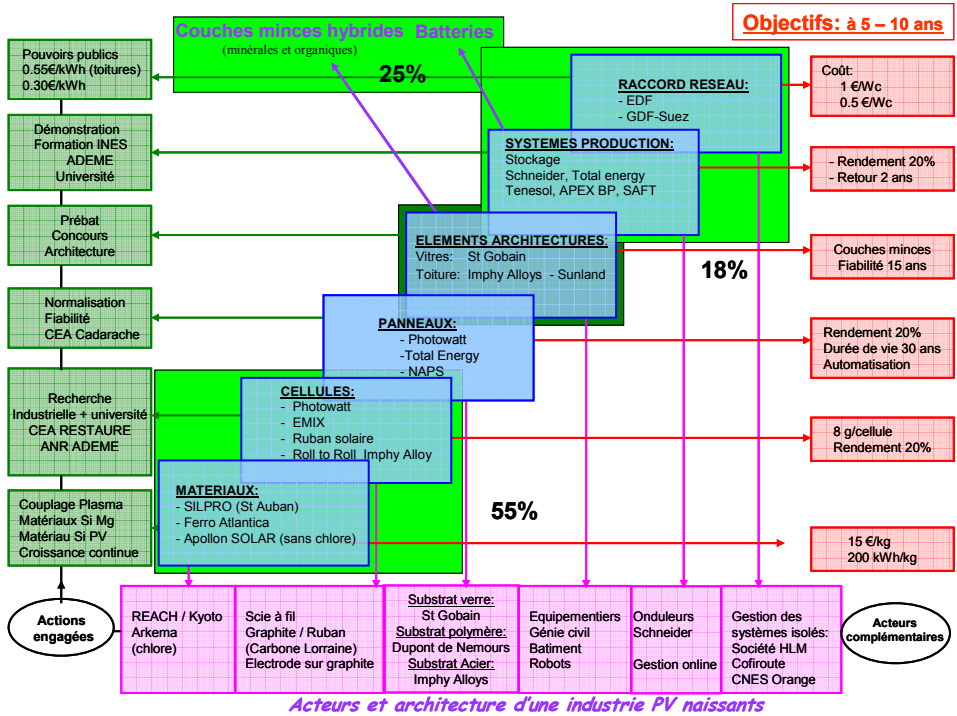
Le retard accumulé par l'industrie française est grand, il n'a toutefois pas atteint un stade où il serait devenu irrattrapable. **Un engagement fort dans la filière photovoltaïque remettrait en cause les hiérarchies établies.** Or, votre rapporteur en est convaincu, la France dispose des atouts nécessaires à un décollage fulgurant. En 2007, le marché du photovoltaïque français a doublé par rapport à 2006 mais, compte tenu de son développement très récent, il ne représente que 75 MW de puissance installée. **La France est particulièrement en retard par rapport aux autres pays européens** : alors que la puissance installée atteint 46 Wc par habitant en Allemagne et que la moyenne européenne s'établit à 8 Wc, elle n'est que de 0,77 Wc par français. On n'a installé que 323 000 m² de capteurs en 2007, à comparer avec 1,5 million de m² en Allemagne. **Or la demande est en croissance rapide et ce défaut d'équipement dans les années passées se traduira nécessairement par un surcroît d'investissement dans les mois à venir. L'existence à court terme d'un marché massif et solvable ne fait pas débat**, particulièrement au moment où l'Etat réaffirme ses engagements en faveur des énergies nouvelles renouvelables.

Outre les performances reconnues de ses équipes de recherche, La France a investi le secteur de l'énergie solaire à travers une **myriade de petites entreprises innovantes**. Il ne manque finalement qu'une **consolidation du secteur**, laquelle pourrait être opérée conjointement par les incitations de l'Etat pour une approche concertée de l'ensemble du site et par l'entrée en jeu des fleurons nationaux de l'énergie et de l'habitat, dont les stratégies semblent s'orienter vers une présence accrue.

II.3.— LES ACTEURS FRANÇAIS DU SECTEUR ET LEURS LACUNES

La France est présente sur la presque totalité de la chaîne de production par l'intermédiaire de **jeunes entreprises innovantes, qui s'adossent rapidement à des grands groupes du secteur de l'énergie, et par les filiales de ces opérateurs** qui fréquemment travaillent de concert.

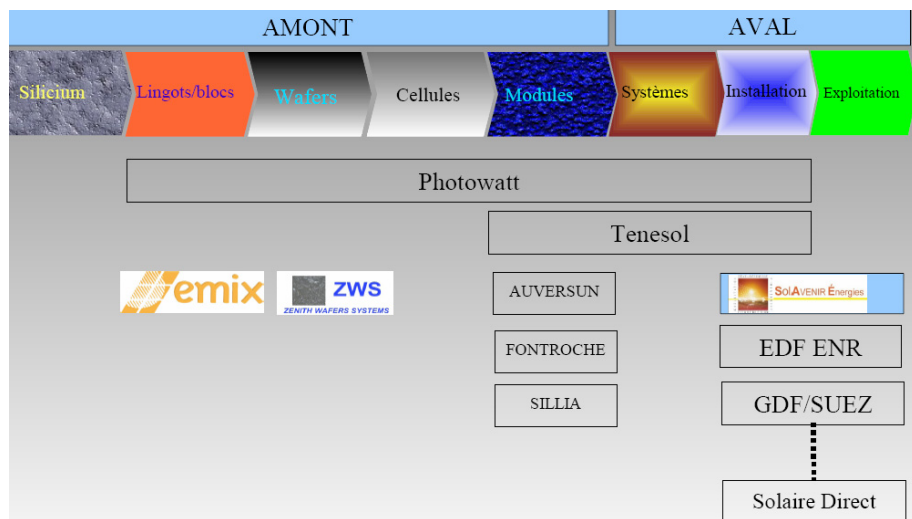
Votre rapporteur s'est ainsi rendu sur le site de production toulousain de l'entreprise Tenesol, codétenue par Total et EDF. Il a également visité les installations de **Photovoltech** à proximité de Bruxelles, société de droit belge mais dont l'actionnariat se partage entre Total et GDF Suez via Electrabel. Le potentiel de croissance apparaît impressionnant. Pour des firmes de taille mondiale comme celles-ci, **l'appréhension du marché photovoltaïque diffère fondamentalement des analyses que livrent les spécialistes du secteur. L'ouverture d'une usine ne représente jamais que l'équivalent de quelques forages en mer.** La décision d'entrer en force sur le marché réordonnerait sans délai la hiérarchie mondiale au bénéfice de la France. Il reste que les énergéticiens et les groupes pétroliers n'ont pas encore effectué totalement la transition de leur cœur de métier vers les énergies renouvelables.



La filière a créé environ deux mille emplois depuis deux ans. Les projets annoncés représentent un gisement de plusieurs milliers de postes d'ingénieurs, de techniciens, d'installateurs et d'ouvriers qualifiés. Selon l'ADEME, le marché a généré quatre cents millions d'euros de revenus en 2007. En 2012, il pourrait représenter deux milliards d'euros et treize mille emplois si les perspectives explorées se révèlent fructueuses. Les investissements dans les activités industrielles de fabrication d'équipements ont été manifestes, chaque entreprise de conception de cellules et de modules visitée par votre rapporteur augmentant ses capacités de production.

La recommandation essentielle pour structurer la filière française tient à la fermeture de la boucle de production. Les innovations et les synergies se trouvent grandement freinées par les étapes non couvertes, qui de fait bénéficient aux concurrents des entreprises françaises. Il est fondamental de parvenir à générer cet effet d'entraînement de l'amont vers l'aval de la filière dont l'Allemagne démontre à quel point il est profitable. Votre rapporteur insiste sur ce point avec une résolution d'autant plus grande que l'industrie photovoltaïque ne fait que peu l'objet de délocalisations, surtout dans ses étapes les plus techniques. On peut envisager d'exporter vers le sud-est asiatique une usine d'assemblage de modules livrée clef en main, encore que la pertinence économique de cette option reste à démontrer en raison de ses faibles besoins de main d'œuvre non qualifiée. En revanche, il est peu probable de voir délocalisées des installations de purification de silicium, par nature localisée à proximité des

carrières et des bassins industriels pour limiter le transport de pondéreux. De même, le découpage des lingots en plaquettes offre peu de prise à l'argument des bas salaires. **L'essentiel réside plutôt dans la qualité des infrastructures publiques et dans les compétences des équipes de recherche et d'ingénierie.**



Le paysage industriel français aujourd'hui, étape par étape (source EMIX)

Ce sont des points sur lesquels la France peut faire valoir ses qualités. Il lui revient de résorber ses lacunes industrielles. Des projets séduisants existent. Pour la purification du silicium, la crise financière a interrompu la constitution de *Silicium de Provence*, entreprise dont la pertinence du modèle économique et pourtant largement défendue. Le découpage en plaquettes des lingots, autre point faible de la filière française, devrait bientôt se trouver résolu par l'apparition d'un nouvel acteur dans la région mosellane.

A. La production de silicium et le projet SILPRO

Le projet *Silicium de Provence* (SILPRO) tire son origine d'une **ambition de revitalisation d'un bassin économique en difficulté et d'une volonté de faire exister la filière française photovoltaïque dans la première étape de la chaîne de production**, la purification du silicium. Le contexte de 2006, moment des premières opérations de constitution de l'entreprise, apparaissait tout à fait porteur alors que la spéculation sur le silicium voyait croître sans cesse le cours du matériau. Les groupes qui se sont intéressés au projet et qui ont apporté des fonds démontrent sa **crédibilité : la compagnie néerlandaise Econcern, le français EDF Energies Nouvelles, le producteur norvégien de plaquettes NorSun** ou encore le spécialiste des toitures photovoltaïques Photon Power Technologies.

Le site devait créer deux cents emplois et produire deux à trois mille tonnes de silicium par an, capacité extensible sans difficulté pour suivre une possible hausse de la demande. Il devait bénéficier de synergies avec les

installations chimiques voisines d'Arkema, qui lui fourniraient des gaz nécessaires aux cellules photovoltaïques.

Le projet bute malheureusement sur la **conjugaison de difficultés systémiques, sectorielles et spécifiques**. La **crise financière internationale** complique la sécurisation des investissements et a provoqué le retrait de plusieurs partenaires privés. Les **cours du silicium**, au plus haut lorsque l'entreprise a vu le jour, ont subi depuis la contraction du marché et le retournement mondial induit par l'apparition de nouveaux producteurs et par la quasi-extinction du marché espagnol consécutive à la réorientation de la politique tarifaire de Madrid. Enfin, les coûts envisagés ont dérapé en raison du **surdimensionnement du projet** imposé par les partenaires chimistes.

Silpro jouit toujours d'un soutien public fort de la part des autorités gouvernementales comme de la Caisse des dépôts et consignations. Néanmoins les **défaillances de son actionnariat** – notamment le retrait d'Ecoconcern – et les doutes des banques ont conduit à une **mise en redressement judiciaire** et à une tentative de redimensionnement à la baisse du projet. Il en résulte des coûts et des délais préjudiciables alors que des fonds sont déjà engagés et que toutes les autorisations d'exploitation ont été obtenues. La restructuration sociale engagée par Arkema fin 2008 n'incite guère à l'optimisme.

Votre rapporteur déplore l'interruption du projet alors que le marché photovoltaïque connaît une croissance exponentielle qui annonce seulement la généralisation de ses technologies une fois franchi le seuil de parité réseau. Rien ne laisse craindre que les difficultés rencontrées soient de nature structurelle et non conjoncturelle. De plus, **la crise frappe également les projets concurrents** de nature similaire. Pour l'heure, il n'existe qu'une seule usine de purification du silicium en Europe, située en Bavière.

Silpro présente tous les caractères d'un projet stratégique d'infrastructure. Si le FSI ne peut intervenir dans ce qui n'est encore qu'un projet et non une entreprise opératoire, on peut supposer que **les fonds du grand emprunt national prochainement ouvert à la souscription trouveraient à s'employer utilement dans un apport à sa concrétisation.** Il est entendu que l'Etat n'a pas vocation à se substituer au secteur bancaire et qu'il procède déjà par voie d'incitation et à travers la participation de la Caisse des dépôts et consignations. Son engagement, toutefois, serait de nature à **rassurer les investisseurs** et à **lever les hypothèques** qui pèsent désormais sur l'avenir d'un silicium provençal.

B. La production de plaquettes

L'autre faille dans la couverture du cycle du silicium par les entreprises françaises se trouve dans la **production de plaquettes à partir des lingots de silicium**. Si on excepte Photowatt, entreprise intégrée qui utilise la totalité de sa production pour la conception de ses cellules, aucun opérateur n'est en mesure de

satisfaire la demande des usines françaises de cellules. **Votre rapporteur l'a constaté à Toulouse, Tenesol faisant appel à des fournisseurs allemands.**

Total et GDF Suez ont néanmoins annoncé récemment leur intention d'investir soixante-dix millions d'euros dans une unité de fabrication de plaquettes de silicium à Vernejoul, en Moselle. Spécialisée dans l'étape du cycle immédiatement précédente, **cette nouvelle entité complèterait idéalement l'usine de cellules Photovoltech**, contrôlée par les mêmes actionnaires. Par l'écoulement de la production opérée en France sur un site localisé en Belgique, cette initiative pourrait poser la **première pierre d'une stratégie industrielle européenne du photovoltaïque**. Il reste cependant à voir si le dimensionnement de cette usine permettra l'approvisionnement de l'ensemble des fabricants, y compris les unités concurrentes du groupe, ou si son **couplage avec les chaînes de Photovoltech** revêtira un caractère exclusif.

II.4.— LA MOBILISATION ATTENDUE DES CHAMPIONS DE LA CONSTRUCTION ET DE L'ENERGIE

La filière française se compose pour l'essentiel d'un réseau de petites et moyennes entreprises innovantes que surveillent les grands groupes du secteur de l'énergie pour **détecter les potentiels respectifs** et monter au capital suite à l'identification d'une technologie prometteuse. **Les usines de cellules et de modules situées sur le territoire ou dans sa proximité immédiate sont, hormis Photowatt, codétenues directement ou indirectement par EDF, Total et GDF Suez.** Le marché national n'est donc pas aussi performant qu'il pourrait et devrait l'être. Une **consolidation** autour des grands opérateurs permettrait de **sortir de l'ère de l'artisanat et de l'innovation sauvage pour pleinement entrer dans la recherche appliquée et la production industrielle rationalisée**. Elle amènerait également une **intégration verticale** permettant de réduire les coûts et de sécuriser les approvisionnements. **Votre rapporteur forme le vœu que les énergéticiens réalisent prochainement tout le potentiel du photovoltaïque** et l'élèvent au rang de priorité dans leur politique de développement.

Les auditions préparatoires au présent rapport ont cependant jeté sur le secteur un éclairage inattendu, mettant en lumière **l'opportunité que pourraient trouver d'autres acteurs économiques à investir le marché dès lors que la France opère clairement un choix en faveur de l'intégration au bâti**. Les équipements solaires appellent alors certes une technologie électrique, mais aussi une compétence en matière de construction. Votre rapporteur a été particulièrement intéressé par **l'intérêt que portait le groupe Saint-Gobain au secteur photovoltaïque**. **L'entreprise contrôle déjà la moitié des approvisionnements en verre des fabricants de module, sans lesquels les systèmes ne peuvent fonctionner**. Dans une optique de diversification de son activité, elle s'est également engagée dans la production solaire, mais **ses partenariats avec Shell et Siemens ajoutés aux aides publiques dispensées l'ont conduite à implanter sur le territoire allemand un centre de fabrication de panneaux en couches minces de CIS** et les équipes de recherche afférentes.

L'arrivée de Saint-Gobain ouvre cependant des perspectives. **Le groupe a pris la décision d'occuper l'aval du marché** à travers sa filiale *Saint-Gobain Solar*. Il commercialise par conséquent des systèmes photovoltaïques mais, du fait de sa compétence avancée dans la conception des matériaux et par son association aux professionnels de la couverture, **il est en mesure de proposer des produits qui privilégient l'intégration architecturale** : des toits certes, mais aussi des verrières, des auvents, des garde-corps, etc. L'audition de ses représentants a montré la **part déterminante jouée par la prime tarifaire d'intégration au bâti dans l'option stratégique retenue**. Si d'autres groupes français spécialistes de la construction et du travail des matériaux s'insèrent pareillement sur le marché, le pari français de structuration de la filière sera sans doute gagné. La compétence spécifique dans la conception des équipements parfaitement intégrés assurera, à n'en pas douter, un rang mondial à la France.

Dès lors que les capacités industrielles seront au niveau de la demande, le développement de la filière photovoltaïque sera gagé du point de vue économique. Les pouvoirs publics ne devront cependant pas négliger d'organiser en conséquence l'installation des systèmes pour prévenir les sinistres et généraliser les compétences parmi les artisans installateurs.

III.— UNE PÉDAGOGIE DE LA CONFIANCE ENVERS LE GRAND PUBLIC

Aborder le sujet de la filière photovoltaïque consiste à exposer les déterminants économiques du secteur et les avantages environnementaux qui accompagnent ces technologies. Votre rapporteur s'y est attaché dans les lignes qui précèdent. Toutefois, on ne peut occulter les **conséquences de l'irruption de ces nouveaux équipements dans la vie de tous les jours, dans les habitudes sociales et dans les formalités administratives générales**. Pour accompagner le changement, **le citoyen doit pouvoir faire appel à des professionnels correctement informés et décidés à lui procurer la meilleure information qui soit**. Ainsi que l'expose le tableau ci-après, un marché photovoltaïque mature ne se cantonne pas à des fournisseurs d'énergie engagés et à une réglementation publique de soutien.

Votre rapporteur considère qu'il n'est pas dans le champ de compétence des pouvoirs publics de structurer des groupes de consommateurs. Le rôle joué par l'Etat dans les offres de financement proposées par les établissements de crédit apparaît également limité, sans préjudice des aides sociales et fiscales dont peut profiter un foyer qui décide d'acquérir et d'installer des panneaux solaires.

En revanche, il est certain que **l'action publique doit embrasser le champ de la communication médiatique** dans la mise en œuvre d'une politique de lutte contre le changement climatique qui impose une prise de conscience de l'ensemble de la population. Il revient également à la puissance publique de **veiller à la compétence des professionnels sur le terrain** afin d'éviter les poses imparfaites et dangereuses qui, lorsqu'elles provoquent un sinistre, plongent des

familles dans le malheur et génèrent une mauvaise publicité à la filière. Une défaillance doit cependant être prévue et prévenue par les **compagnies d'assurance** et par l'édiction de **normes de qualité intransigeantes**.

L'ÉVOLUTION D'UN MARCHÉ DU PHOTOVOLTAÏQUE

	Etape 0 Démonstration	Etape 1 Marché de niche	Etape 2 Marché mature
Installateurs	Peu de spécialistes.	Réseau de spécialistes, formation limitée.	Spécialistes et généralistes, formation nécessaire.
Consommateurs	Peu d'utilisateurs.	Précurseurs, pionniers. Début de la prise de conscience.	Structuration de groupes de consommateurs.
Fournisseurs d'énergie	Défaut d'expérience. Besoin d'assurance.	Premières tentatives d'aborder le marché. Résistances au changement.	Standardisation de l'intégration au bâti et de l'accès au réseau.
Médias	Aucune couverture.	Couverture faible, traitement dans le domaine des informations insolites.	Couverture grandissante, traitement standard de l'information.
Etablissements de crédit	Aucune offre.	Peu d'offres, fortes surtaxes.	Offres de financement spécifiques.
Règlementation	Règles ponctuelles et <i>ad hoc</i> .	Règles pour l'accès au réseau et au tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque.	Tarif d'achat voué à couvrir les coûts d'investissement.

III.1.— INFORMER LA POPULATION

La communication politique n'a pas pour objet de pousser à la consommation d'un certain type de biens au détriment de produits substituables, notamment lorsqu'ils sont discriminés sur la base du lieu de fabrication. Le droit public français comme la justice communautaire s'y opposeraient fermement et avec raison. Néanmoins, cette objection n'a pas lieu d'être lorsque l'objectif poursuivi revêt un aspect moins économique qu'environnemental. Il est souhaitable, nul ne le contestera, que les pouvoirs publics fassent œuvre de **pédagogie pour sensibiliser la population aux bienfaits de la lutte pour la maîtrise de la consommation d'énergie et la généralisation des productions d'électricité de source renouvelable**. Cette mission est confiée à une agence spécifique, l'ADEME (**Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'ÉNERGIE**), qui s'emploie par conséquent notamment à promouvoir les équipements photovoltaïques auprès du grand public.

L'ADEME est un **établissement public à caractère industriel et commercial**, placé sous la tutelle conjointe des ministères en charge de l'Ecologie,

de l'ÉNERGIE, du Développement durable et de la Mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le Climat d'une part, et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche d'autre part. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Pour une généralisation de la démarche environnementale, l'Agence met à disposition des entreprises, des collectivités et des citoyens ses **capacités d'expertise et de conseil**. Elle aide au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre, dans le domaine notamment des énergies renouvelables.

Votre rapporteur considère fondamentale la mission de l'ADEME en tant qu'interface et banque d'information pour les particuliers comme pour les professionnels. Dans un secteur particulièrement innovant et où l'action publique est appelée à se reconfigurer fréquemment pour réagir aux évolutions technologiques et aux transformations du marché, **l'expertise dont elle fait preuve recèle une valeur inestimable.** De plus, ses contacts permanents lui donnent une connaissance rapide de l'information qu'elle peut ensuite traiter ou transmettre aux autorités compétentes.

Votre rapporteur a retenu de ses entretiens avec l'Agence la **confirmation du crédit que connaît l'énergie photovoltaïque aux yeux de la population.** Celui-ci ne doit être obéré ni par la médiatisation de dysfonctionnements qui ne constitueraient qu'un épiphénomène, ni par une expansion trop brutale dans les paysages urbains et campagnards des technologies photovoltaïques.

Sur le premier point, il a été recommandé de **prêter une attention particulière à la formation des artisans** qui procèdent à la pose des systèmes photovoltaïques au domicile des particuliers. Si une mauvaise information sur la législation fiscale peut être rectifiée par un simple appel téléphonique à l'ADEME, nul ne peut prémunir l'acquéreur d'un branchement défectueux de son équipement. Il en résulterait alors au mieux une dégradation du rendement de conversion photovoltaïque, au pire un dommage sur la structure de l'habitat exposant le bâtiment aux intempéries et aux risques d'incendie. La prévention de ces mésaventures passe par une formation exigeante dispensée aux professionnels du solaire. Or **les enseignements et les qualifications, quoiqu'en progression constante, semblent tout à fait perfectibles.** Des normes drastiques imposées aux produits et l'inclusion des nouvelles technologies solaires dans les polices d'assurance constituent, de fait, les meilleures garanties.

Sur le second aspect, l'Agence a insisté sur **l'inadéquation des fermes solaires géantes et des mentalités françaises.** La couverture de centaines d'hectares par des panneaux solaires n'aboutirait qu'à un rejet massif de la part de la population, surtout si elle se doublait de problématiques foncières. Les premières contestations commencent à être entendues, y compris d'ailleurs à l'encontre de l'intégration au bâti qui remettrait en cause les **traditions esthétiques** urbaines. Ces voix sont encore tout à fait minoritaires. L'Etat, s'il

espère un développement rapide des puissances photovoltaïques installées, doit s'attacher à prendre en compte les revendications de façon à limiter les hostilités.

III.2.— AMÉLIORER LA FORMATION DES PROFESSIONNELS DU SECTEUR

Les équipements photovoltaïques font appel à une technologie complexe, qu'il est particulièrement délicat de maîtriser en l'absence de formation adéquate. Or **l'expansion du marché a multiplié les vocations**. Le traditionnel plombier chauffagiste a été sollicité pour procéder à des installations, comme l'électricien. La réduction des taux de crédit d'impôt en faveur des pompes à chaleur a encore réorienté vers le photovoltaïque des opérateurs peu qualifiés, contraint de se former à l'usage. **Certains, peu sourcilleux de la qualité de leurs prestations, se sont probablement réjouis du manque d'encadrement du secteur par la réglementation publique.**

Le décollage du marché et son explosion prochaine ne permettent plus de laisser sans formation les professionnels du secteur. Certes, **ceux-ci se sont déjà organisés pour pallier les carences des filières d'enseignement**. Votre rapporteur a rencontré à Perpignan le président de *QualiPV*, dispositif de certification destiné au photovoltaïque que gère l'association *Qualit'EnR*. Celle-ci réunit cinq acteurs majeurs du monde du bâtiment et de l'énergie : la CAPEB (confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment), Enerplan (association professionnelle de l'énergie solaire), l'UCF (union climatique de France), l'UNCP (union nationale de couverture plomberie) et le SER (Syndicat des Energies Renouvelables). *QualiPV* est une **démarche volontaire** des entreprises qui s'engagent à respecter les *10 points solaires PV* d'une charte qualité et à **former leurs installateurs** en conséquence. Elle permet ainsi aux particuliers de distinguer les professionnels correctement formés des intervenants occasionnels et peu scrupuleux.

L'initiative *QualiPV* va dans le bon sens et elle a répondu à un réel manque. Lancée à l'automne 2007, la certification a été octroyée moins de deux ans plus tard à **plus de trois mille artisans sur tout le territoire**. Deux référentiels de formation sont proposés, l'un d'une journée, l'autre réparti sur trois jours.

Votre rapporteur salue la **responsabilité des professionnels** qui ont souhaité permettre au particulier de distinguer en leur sein les meilleures pratiques. Cette certification constitue la **première étape dans la construction d'un réseau de professionnels efficaces et sûrs** sur lesquels la filière photovoltaïque pourrait compter dans son développement. Il encourage par ailleurs l'association à enrichir son programme de formation de cours sur les technologies de couverture et d'une approche sur les principes du bâtiment.

QualiPV ne représente cependant qu'une partie de la réponse. Si l'entente des professionnels en réponse à une carence évidente de l'action publique dans la formation a permis d'assainir le marché des installateurs les moins

recommandables, il ne saurait être question de leur confier définitivement l'intégralité de cette responsabilité qui ne doit pas leur échoir, sauf à vouloir reconstituer les anciennes pratiques des corporations.

La charte *QualiPV*

1. Posséder au sein de son entreprise les compétences professionnelles nécessaires, acquises par la formation initiale ou continue, et/ou par une pratique confirmée. Etre à jour de ses obligations légales, et disposer des garanties légales couvrant explicitement l'ensemble des activités et travaux qu'elle réalise
2. Préconiser des matériels et équipements photovoltaïques conformes aux exigences réglementaires et être le relais des informations de l'Association Quali'EnR et des organismes publics,
3. Assurer auprès du client un rôle de conseil, l'assister dans le choix des solutions les mieux adaptées, compte tenu du "gisement solaire" local, des contraintes du site, et de la possibilité de raccordement au réseau,
4. Après visite sur site, soumettre au client un devis descriptif écrit, détaillé et complet, de l'installation solaire qu'elle propose, en fixant un délai de réalisation, des termes de paiement et des conditions de garantie légale,
5. Informer le client sur les démarches nécessaires, relatives en particulier aux déclarations préalables de travaux, aux demandes d'autorisation de raccordement et de production d'électricité, aux conditions d'octroi des aides publiques et des incitations fiscales en vigueur, telles que portées à sa connaissance par l'association Quali'EnR
6. Une fois l'accord du client obtenu (devis co-signé), réaliser l'installation commandée dans le respect des règles professionnelles, normes et textes réglementaires applicables, selon les prescriptions prévues,
7. Mettre en service l'installation, puis procéder à la réception des travaux en présence du client. Lui remettre les notices et tous documents relatifs aux conditions de garantie et d'entretien/maintenance du générateur photovoltaïque raccordé au réseau électrique,
8. Remettre au client une facture descriptive détaillée (qui distingue a minima le poste "fourniture des équipements", et le poste "main d'œuvre) et complète de la prestation, conforme au devis (avec désignation précise des équipements relatifs au générateur photovoltaïque installé). Fournir en outre toute attestation signée dont celui-ci aurait besoin pour faire valoir ses droits aux primes publiques, au crédit d'impôt, et au tarif d'achat de l'électricité solaire,
9. En cas d'anomalies ou d'incidents de fonctionnement de l'installation signalés par le client, s'engager à intervenir sur le site dans des délais rapides, et procéder aux vérifications et remises en état nécessaires, dans le cadre des obligations d'intervention attachées à la garantie biennale,
10. Favoriser toute opération de contrôle que l'Association Quali'EnR ou son mandataire souhaiterait effectuer sur ses réalisations, aux fins d'examiner les conditions de mise en œuvre et de réalisation des prestations.

Les pouvoirs publics ont eu suffisamment de temps pour appréhender cette nouvelle profession et pour lui faire correspondre une nouvelle formation. Un **baccalauréat professionnel** mention *efficacité énergétique* serait prochainement disponible dans l'enseignement secondaire. L'INES procède à des formations de tous niveaux. Un **master sur les énergies nouvelles** existe à l'Université de Nantes. Enfin, la voie du **certificat de qualification professionnelle** pourrait être utilement explorée pour dispenser une formation initiale et continue – une maquette de 350 heures a même été mentionnée à votre rapporteur au cours de ses auditions.

Une chose n'est pas en débat : **les nouvelles technologies ont abouti à l'apparition d'une nouvelle profession.** Il s'agit, désormais, d'en prendre acte et de préparer son exercice par des professionnels compétents et correctement instruits. La bataille lexicale est d'ailleurs engagée pour désigner le nouveau métier. Parlera-t-on prochainement de *solaristes*, de *solariteurs*, de *photovoltaïciens* ? Ce débat appartient à l'usage, sinon à l'Académie.

Votre rapporteur insiste enfin sur l'impérieuse nécessité de **sensibiliser les architectes aux technologies photovoltaïques**, sans quoi l'entrée des équipements solaires dans les habitudes de construction pourrait encore tarder.

III.3.— DÉVELOPPER DES GARANTIES ASSURANTIELLES ET NORMATIVES CONTRE LES MALFAÇONS

La dernière question liée au développement du photovoltaïque est celle de la garantie de la qualité des produits et des installations, hors la question de la formation des professionnels.

Votre rapporteur appelle à l'édition de normes draconiennes sur la qualité des systèmes photovoltaïques mis à disposition du grand public. Des modules défectueux en grand nombre seraient tout à fait néfastes au bon développement de cette source d'énergie en France, **soit que des rendements très en deçà des performances annoncées jettent la suspicion sur la totalité de la filière, soit que des malfaçons provoquent des accidents périlleux dont le législateur doit protéger les citoyens.** De surcroît, dans un contexte de féroce compétition internationale mettant aux prises les entreprises françaises avec des sociétés étrangères et où la décision du consommateur se fonde principalement sur le prix affiché, **la recherche d'une égalité dans l'affrontement commercial exige la fixation de standards élevés pour tous.** Le rôle des organismes de contrôle sera ici prépondérant.

Il convient également de **prêter un regard attentif aux garanties dont bénéficient les acquéreurs face à d'éventuelles imperfections dans les modules** de leur choix. **Votre rapporteur est dubitatif sur les assurances de remplacement émises par des sociétés nouvellement créées dans des pays émergents et dans une atmosphère de foisonnement industriel. Qui sait ce qu'il adviendra de ces entités alors que la crise économique frappe** et que les groupes les mieux établis prévoient un raidissement du marché qui verrait

disparaître jusqu'à 80 % des opérateurs ? Il a été suggéré d'**imposer aux producteurs le recours à des assurances externes**, sur le modèle du secteur de l'automobile. **Votre rapporteur est séduit par cette idée à propos de laquelle il sollicite l'expertise du gouvernement.**

Votre rapporteur a enfin souhaité entendre les représentants de la **fédération française des sociétés d'assurance** pour juger si l'impact des technologies photovoltaïques sur les risques inhérents au secteur du bâtiment avait été correctement appréhendé. Ceci semble tout à fait nécessaire pour **protéger au mieux les particuliers**. Il ressort des investigations de l'Agence qualité construction (AQC) que **les panneaux photovoltaïques ne représentent qu'un faible supplément de risque**. Les probabilités d'incendie et de dommage causé par la foudre sont certes légèrement accrues, mais **aucun sinistre n'est jamais survenu pour l'heure**.

En ce qui concerne le régime de responsabilité applicable, **le panneau solaire n'est pas un élément pouvant entraîner la responsabilité solidaire**. Il ne **bénéficie pas de la garantie décennale** s'il n'est pas intégré au bâti ; dans le cas contraire c'est avant tout la responsabilité de l'installateur qui est engagée.

L'assureur n'est pas tenu de garantir la performance productrice de l'installation. Celle-ci, même défectueuse, ne met pas en péril le caractère habitable du bâtiment, sauf éventuellement en l'absence de connexion à une source alternative d'électricité. Une **évolution jurisprudentielle ou législative** pourrait remettre en cause cette position. **Votre rapporteur s'interroge sur son opportunité, qui ne manquerait pas de renchérir les primes exigées des particuliers pour un gain finalement négligeable si les normes auxquelles sont soumises produits et installateurs sont correctement conçues et mises en œuvre.**

Les assureurs acceptent de garantir tous les types d'installation photovoltaïque sans considération de l'avis du CSTB eu égard au faible volume de marché en jeu. Cette position pourrait toutefois évoluer avec la croissance du parc. Il est enfin envisagé de développer une assurance caution spécialement destinée aux travaux d'amélioration de la performance énergétique, qui semble être réclamée par les opérateurs et qui compléterait idéalement les efforts entrepris en matière de formation des professionnels.

NEUF LIGNES DIRECTRICES POUR UN PROGRAMME NATIONAL DE DÉVELOPPEMENT DE LA FILIÈRE PHOTOVOLTAÏQUE

1. Préparer l'échéance de la parité réseau

- Tracer dans la loi des axes stratégiques ambitieux et réalistes et confier au règlement la fixation des différents tarifs d'achat
- Poser une règle de dégressivité des tarifs et de correction automatique en fonction du volume de marché et de l'approche de la parité réseau
- Maintenir un statu quo tarifaire en Corse et dans les départements d'outre-mer

2. Prévenir les conflits d'usage et la captation des terres arables par des centrales solaires

- Faire établir par l'ADEME une liste des terres éligibles à l'installation de fermes solaires
- Exiger que les projets de fermes solaires aient un impact environnemental positif
- Instaurer une caution foncière pour éviter la spéculation

3. Intégrer à l'économie du secteur une réflexion sur l'aménagement du territoire

- Régionaliser le tarif d'achat en fonction de la variable d'ensoleillement
- Répartir les fermes solaires sur l'ensemble du territoire national

4. Miser sur l'intégration au bâti pour positionner la filière française

- Conserver les principes de fonctionnement du tarif d'achat et le seuil des 3 kWc
- Définir au niveau national des critères objectifs et précis « d'intégration au bâti »
- Instaurer un tarif d'achat intermédiaire pour l'équipement des bâtiments sans intégration
- Réfléchir à une définition juridique de l'intégration architecturale dans l'optique d'un bonus tarifaire
- Créer une commission de qualification des équipements

5. Adapter le cadre administratif au dynamisme du secteur

- Simplifier les formalités de raccordement et accélérer les délais exigés par ERDF
- Faire perdurer les dispositifs fiscaux de soutien à la filière
- Clarifier le régime administratif et fiscal des fermes solaires
- Instaurer des contrôles pour éviter des fraudes massives généralisées

6. Donner à la recherche française les moyens de la performance

- Privilégier l'énergie solaire dans les investissements publics en faveur des énergies nouvelles
- Soutenir l'ensemble des filières technologiques silicium, CIS et polymères
- Améliorer le passage de la recherche à l'application industrielle
- Coupler les recherches sur le photovoltaïque avec celles sur le stockage
- Poursuivre les recherches sur les concentrateurs et explorer leurs modalités d'exploitation

7. Assurer la consolidation du secteur industriel français

- Engager les fleurons nationaux de l'énergie et des matériaux à investir le secteur
- Faire émerger des entreprises françaises sur la totalité de la filière
- Edicter des normes exigeantes de qualité sur les équipements photovoltaïques
- Accentuer les investissements dans les capacités productives pour combler le retard français
- Mobiliser les crédits issus du grand emprunt national et du Fonds stratégique d'investissement

8. Mettre l'énergie photovoltaïque à disposition du grand public

- Poursuivre la tâche d'information et de communication entreprise par l'ADEME
- Mobiliser les compétences des métiers du bâtiment
- Ouvrir des formations qualifiantes, initiales et continues, à destination des professionnels
- Lier la production et la consommation d'électricité photovoltaïque aux progrès de la domotique
- Observer la bonne couverture des risques par les compagnies d'assurance

9. Introduire une composante photovoltaïque forte dans le plan solaire méditerranéen

EXAMEN EN COMMISSION

Lors de sa réunion du jeudi 16 juillet 2009, la commission des affaires économiques a examiné, conjointement avec la commission du développement durable et de l'aménagement du territoire, le rapport d'information de M. Serge Poignant sur l'énergie photovoltaïque.

M. le Président Patrick OLLIER. Le rapport dont la publication est aujourd'hui soumise à votre approbation résulte des travaux de la mission sur le photovoltaïque confiée au vice-président de la Commission des affaires économiques, Serge Poignant, à l'automne 2008.

Avec Christian Jacob – que je félicite pour son élection à la présidence de la Commission du développement durable et de l'aménagement du territoire – nous n'avons pas imaginé un instant que nos deux commissions n'examinent pas ensemble ce rapport passionnant, ce qui explique cette première réunion conjointe.

Comme chacun le sait, l'énergie photovoltaïque est la plus onéreuse à produire. Elle coûte plus cher encore que l'éolien. C'est dire ! Pourtant, et Christian Jacob et moi en débattions hier encore avec le Premier ministre lors d'une réunion sur les perspectives d'utilisation du grand emprunt national, nul ne conteste l'intérêt de créer une véritable filière photovoltaïque, d'en vulgariser la connaissance et de faciliter l'accès de la population à cette énergie.

Mais je ne veux pas en dire davantage à ce stade et je laisse donc la parole à Christian Jacob pour compléter cette introduction.

M. le Président Christian JACOB. Je m'associe pleinement aux propos que vient de tenir le Président Ollier. Dans le cadre du Grenelle de l'environnement, nous avons fait le choix de porter l'objectif relatif à la part des énergies renouvelables de 20% à 23%. C'est dire si les enjeux que retrace le présent rapport nous importent au premier chef. Bien entendu, cela ne va pas sans poser certains problèmes, comme l'artificialisation des sols, sur laquelle nous devons revenir. Il reste qu'il nous faut procéder à une expertise fine de l'ensemble des sources d'énergie renouvelables envisageables et que cet excellent rapport nous y aidera.

Le Rapporteur Serge Poignant communique à la commission les résultats de ses travaux à travers une présentation multimédia. Son intervention est applaudie sur tous les bancs.

M. le Président Patrick OLLIER. Je ne peux que féliciter le rapporteur de la qualité de son travail qui permettra aux commissions de faire des propositions constructives au Gouvernement, notamment au sujet du grand emprunt afin de voir des fonds consacrés à l'énergie photovoltaïque.

M. Philippe TOURTELIER. Nous examinons un excellent rapport dont je partage la plupart des vues, particulièrement en ce qui concerne la mise en valeur du marché domestique. Il convient, en effet, de responsabiliser les citoyens, perspective déjà présente dans le Grenelle 1. Je fais mienne aussi un certain nombre d'interrogations sur les fermes solaires et les conflits d'usage. À cet égard, comment l'ADEME ferait-elle pour désigner les terres éligibles et déterminer un impact environnemental positif ? Je soutiens enfin la proposition d'instaurer une caution foncière.

Pour ce qui concerne la parité réseau, elle peut être obtenue soit par une diminution des coûts du solaire, soit par une augmentation des prix de l'électricité. Or un débat existe aujourd'hui sur le coût de l'électricité et sur la prise en compte en son sein du coût d'amortissement des installations.

Je souscris à l'idée que la mobilisation des grands groupes apparaît comme une nécessité pour la filière.

Enfin, comment interpréter la promesse du Président de la République que, pour un euro investi dans le nucléaire, une somme équivalente le soit dans le renouvelable alors que les pouvoirs publics envisagent de porter la durée de vie des centrales à 60 ans ? On peut d'ailleurs s'interroger sur l'opportunité de la construction d'une deuxième centrale nucléaire EPR. Si les moyens engagés étaient vraiment paritaires, nous disposerions à l'avenir de véritables choix énergétiques.

M. Michel PIRON. Je salue moi aussi l'exposé magistral qui vient de nous être délivré. En ce qui concerne les acteurs privés engagés dans la recherche, quelques très grands noms sont connus, cependant qu'en est-il des PME et PMI françaises alors que ces entreprises sont largement responsables des succès industriels allemands ?

Je souscris volontiers à l'idée d'une dégressivité, mais je m'interroge sur son articulation avec EDF. Quel peut être son engagement, sur quelle durée et avec quelles contraintes ? À cet égard l'aventure espagnole doit être considérée comme exemplaire quant aux risques encourus.

Enfin, très classiquement, je m'interroge sur la gestion des variations de production dues au caractère temporaire de l'ensoleillement. Avec quel *mix* énergétique résoudre cette contrainte ?

M. Bertrand PANCHER. Existe-t-il une évaluation de la surface nécessaire au développement du photovoltaïque, par rapport à l'éolien notamment, dans le contexte d'un objectif de production de 23 % d'énergie renouvelable ?

En ce qui concerne la différence de prix entre le nord et le sud du pays, je connais des investisseurs qui hésitent à se lancer. Quelle échéance envisageriez-vous pour cette augmentation tarifaire dans les régions septentrionales ?

La question de l'acceptabilité du photovoltaïque m'apparaît fondamentale. Il y a dans ma circonscription rurale plus de trois cents éoliennes qui ont fortement endommagé le paysage. Les ZDE existent désormais mais elles sont arrivées trop tard. Ne faudrait-il pas, sur le même modèle, délimiter des zones d'installation pour les fermes photovoltaïques ?

M. Jean-Pierre MARCON. Il me semble que la principale question, déjà abordée par certains parlementaires, demeure celle des coûts du photovoltaïque, tant pour EDF que pour le consommateur. Je m'interroge sur les politiques futures notamment au regard des obligations pouvant être celles d'EDF. Il n'est pas question d'alourdir exagérément notre facture énergétique. Enfin, peut-on préciser à quelle époque le photovoltaïque sera une énergie concurrentielle en France ?

M. Jean-Louis LÉONARD. Une comparaison entre l'impact et les coûts des diverses énergies nouvelles aurait pu figurer dans le rapport. Quelles sont les préconisations du rapporteur en termes de pourcentage de production, en termes de coût, en termes de protection des territoires ? Il faudra, par ailleurs, être particulièrement vigilant à ne pas dégrader les paysages urbains par l'abus d'installation de capteurs et panneaux solaires. Cette intégration urbanistique me semble fondamentale et je crains que le Grenelle de l'environnement ne provoque une explosion des installations dont les maires parvenaient jusqu'à maintenant à limiter la visibilité.

M. Jean-Yves LE DÉAUT. Je félicite Serge Poignant et je salue un rapport qui nous éclaire pour décider de l'avenir. Le plan déterminé par M. Jean-Louis Borloo prévoit l'installation d'une centrale solaire par région : où en sommes nous aujourd'hui dans les appels d'offres ?

N'est-il cependant pas trop tard ? Avec 5 000 installations aujourd'hui alors que nous en envisageons 50 000 à l'horizon 2010 dans la loi de programme du 13 juillet 2005, la France semble avoir accumulé un sérieux retard, notamment en comparaison avec l'Allemagne. Que faut-il faire ?

Dans le domaine de la recherche, un budget de 29 millions d'euros est-il à la hauteur de l'enjeu photovoltaïque, quand on sait les sommes qu'a mobilisé le nucléaire en son temps et alors que nous donnons cette année 26 millions d'euros pour le crédit d'impôt et 86 millions d'euros pour la CSPE ?

En ce qui concerne le coût des cellules photovoltaïques dans le coût total des investissements, quelle part représente-t-il ? La mise en réseau est-elle incluse ? Nous pourrions imaginer de compenser la faiblesse de l'ensoleillement du nord de la France par un nombre supplémentaire d'installations. Il existe de nombreuses jachères industrielles dans notre pays, il serait possible de mettre certaines zones polluées à profit pour y disposer des installations photovoltaïques.

M. François BROTTE. Je soutiens cette idée de faire pardonner une responsabilité dans une pollution par une production d'énergie renouvelable. Je souligne par ailleurs moi aussi que ce rapport fait honneur au Parlement.

Le législateur doit raisonner en prenant en compte tous les types d'énergie disponibles. À titre personnel, je considère le principe de la parité réseau comme contestable.

J'ai rencontré récemment un industriel de ma circonscription qui s'est établi en Allemagne avec cinquante employés et qui y a reçu une aide directe de quatorze millions d'euros, un montant largement supérieur à tout ce qu'il aurait pu obtenir en France. Le sujet est aussi là. L'approche allemande sur l'ensemble de la filière mobilise des moyens colossaux.

La question de la qualité du courant fourni se pose également, même si le sujet n'a pas été abordé. Sera-t-il aussi difficile de transporter l'électricité d'origine photovoltaïque que, paraît-il, l'électricité d'origine nucléaire ? Cette interrogation implique une réflexion sur la localisation des fermes solaires, non seulement dans une logique urbanistique mais aussi en fonction d'une recherche d'équilibre du réseau.

Mme Fabienne LABRETTE-MÉNAGER. Nous sommes tous préoccupés par le bouquet énergétique dont le photovoltaïque est un des éléments. L'écart du prix de rachat entre l'électricité d'origine photovoltaïque et l'électricité d'origine nucléaire peut atteindre un rapport de un à dix. C'est aujourd'hui la contribution au service public de l'électricité qui le prend en charge, mais aux frais de tous les consommateurs. En outre la question du renforcement des infrastructures de réseau se pose avec acuité. Deux départements français sont propriétaires de leurs lignes électriques, la Sarthe et le Loiret. Comment devront-ils financer ces rénovations ?

J'inaugurais dans ma circonscription une installation photovoltaïque communale. Le maire d'une commune est considéré comme commerçant, vendeur d'électricité, et il est à ce titre soumis à l'impôt sur les sociétés. Peut-il alors prétendre aux avantages afférents ?

M. Thierry LAZARO. Il faut demeurer prudent dans les engouements pour une forme de source d'électricité ou une autre. L'expérience de l'éolien a été une catastrophe, dans les pays cathares, dans la Somme, dans le Pas-de-Calais. La diversité des paysages français doit être préservée quel que soit l'attrait du photovoltaïque, dont je suis pourtant un fervent partisan. Il faut donc conduire une réflexion portant sur l'aménagement du territoire et incluant toutes les formes de production d'énergie. Le photovoltaïque peut apparaître comme un faux Eldorado, comme l'a montré le désastre espagnol. Je suis moi aussi favorable à une approche comparée de la globalité des énergies nouvelles renouvelables. Enfin, l'introduction du rapport ne montre pas à mes yeux de façon suffisamment positive que le photovoltaïque n'est pas polluant.

Mme Frédérique MASSAT. Je remercie et félicite le rapporteur pour ce document utile, non seulement aux parlementaires, mais également aux acteurs de la filière. En Ariège, nous avons fait de très gros efforts en la matière, puisque

nous avons 36 bâtiments agricoles neufs et 26 bâtiments existants qui ont installé 21 000 m² de panneaux solaires pour un investissement total de 12 millions d'euros. Un certain nombre de questions restent en suspens et ce sont les parlementaires qui sont sollicités dans ces cas-là. En l'occurrence, la chambre d'agriculture me sollicite régulièrement pour avoir des réponses qui sont évoquées dans ce rapport, notamment pour connaître le régime fiscal applicable et le traitement réservé aux panneaux solaires usagés.

La distinction n'est pas claire entre raccordement et extension des réseaux, et les maires commencent à s'inquiéter. En effet, le raccordement est du fait de EDF et ErDF, alors que l'extension relève de la compétence et du financement de la commune. Le Grenelle 2 pose les problèmes mais ne résout peut-être pas correctement la question des finances locales des maires.

Dans le rapport, vous parlez de « repenser le réseau ». Or aujourd'hui on entend parler d'une augmentation de 20 % du tarif réglementé pour retravailler sur les réseaux de distribution électrique. Y aura-t-il des modifications substantielles des réseaux de distribution à mettre en œuvre du fait du photovoltaïque et qu'EDF ne prend pas suffisamment en compte ? Enfin, sur la régionalisation et l'aménagement du territoire, j'aimerais obtenir quelques précisions du rapporteur.

M. Yves ALBARELLO. Pourquoi avoir dissocié panneaux photovoltaïques (qui permettent la production d'électricité) et panneaux solaires (permettant d'apporter un complément d'eau chaude sanitaire) ? Pourquoi ne pas avoir conduit une réflexion globale sur l'énergie solaire ?

Dans ma commune, je développe l'éclairage public à partir de mâts photovoltaïques construits en Chine, qui tombent souvent en panne. Il y a des gisements à développer au niveau national pour équiper notre pays de cette énergie.

M. le Rapporteur Serge POIGNANT. Je vous remercie pour vos compliments. Le travail fut long et fort intéressant, et je vous remercie également pour vos contributions. Certaines questions méritent d'être reprises dans ce rapport. Je constate avec satisfaction qu'un consensus existe pour préserver les paysages et pour développer un marché domestique suivant le principe d'une intégration architecturale.

S'agissant de l'ADEME, il faut répertorier les sites en jachère industrielle, pollués ou potentiellement pollués, comme par exemple un ancien site de la COGEMA dans mon département. On peut, au-delà de l'installation des panneaux solaires eux-mêmes, dépolluer des sols en utilisant des végétaux spécifiques plantés sous les modules. Des recherches existent en ce sens. A terme, on retrouverait les sols en état.

S'agissant de la parité réseau et du coût de l'électricité, c'est l'EPIA, association d'industriels européens ayant une parfaite connaissance du secteur, qui a publié ces courbes de parité. Elles matérialisent leur survenance décalée d'un

pays à un autre. Certains disent que la France, pour sa partie Sud, y arrivera en 2015, d'autres en 2020, je crois que la vérité est entre les deux. Il faut ajuster en fonction des volumes et par le règlement la dégressivité des tarifs. Je préconise un taux dégressif de 7 à 8 % par an.

Quant au fait d'investir un euro dans l'énergie renouvelable pour un euro dans le nucléaire, je le distingue de la CSPE, qui est un financement de l'obligation d'achat étalé sur tous les consommateurs. Cette annonce est toutefois intéressante. Je préconise que cet euro soit dirigé principalement vers la technologie photovoltaïque. Il y en a d'autres comme l'éolien ou le solaire thermique mais elles sont matures alors que le photovoltaïque est en pleine évolution.

S'agissant de la restructuration des réseaux provoquée par l'électricité solaire, elle est prévue pour 2030, quand une part significative de l'électricité sera réinjectée sur le réseau. Ce n'est donc pas prévu dans l'immédiat.

Beaucoup d'acteurs privés se développent dont certains sur l'ensemble de la filière. Il y a souvent de jeunes sociétés nées de l'université. Il faut les soutenir pour qu'elles puissent croître par la suite.

Pour gérer l'intermittence, la solution réside dans l'injection au réseau, voire dans le stockage. L'INES fait d'ailleurs une double recherche : sur les cellules mais aussi le stockage.

S'agissant de la surface nécessaire pour disposer de 23 % d'énergies renouvelables, nous voulons atteindre en 2020 une puissance installée de 5 400 mégawatts qui sera ensoleillée en moyenne mille heures. La production photovoltaïque serait donc de 5,4 térawattheures, soit 1 % de la production globale d'électricité. Ce n'est encore qu'une phase de décollage. Même les Allemands sont seulement à 1 % sur le territoire national et à 3 % en Bavière. Ils espèrent aller jusqu'à 7 % en 2020, ce qui est significatif mais à moyen terme.

Par comparaison, dix mille éoliennes d'une puissance de deux mégawatts fonctionnant deux mille heures, fournissant quarante térawattheures. L'éolien concourt fortement à l'objectif du Grenelle et aux engagements de Kyoto, mais il se heurte à une limite. La technologie est mature et elle crée un problème de paysage. Au contraire, le photovoltaïque n'en est qu'à ses débuts. Il a une grande marge de progression qui ne sera explorée que dans dix ou vingt ans, avec l'arrivée des couches minces et des toitures équipées en masse.

Concernant le plan Borloo et le lancement de l'appel d'offres pour une ferme solaire par région, il ne correspond qu'à 300 mégawatts. Ces fermes solaires sont nécessaires mais il ne faut pas les multiplier sur le modèle espagnol. Elles ne représentent que 10 % du parc outre-Rhin : les Allemands privilégient les toitures.

Si l'on recourt à un tarif différencié en fonction de l'ensoleillement, les fermes solaires auront un intérêt industriel même dans le Nord de la France.

Encore une fois, il faut les réserver à des sites appropriés. Je tiens à éviter les conflits d'usage. La loi Grenelle 2 devra le mentionner.

Je signale qu'il y aura bientôt une marge de manœuvre dans le cadre de la CSPE avec la fin des aides à la cogénération. Certains transferts de charge vont probablement pouvoir être opérés.

Le potentiel est formidable à long terme pour le photovoltaïque en France, sans parler de la Californie, du Sahara, du Sud de l'Espagne où l'ensoleillement direct permet de produire de l'électricité en grande quantité.

Je suis d'accord avec ce qui a été dit sur l'intégration urbanistique ou architecturale.

L'objectif de cinquante mille toits photovoltaïques en 2010 posé par la loi de programme de 2005 n'est peut-être pas inaccessible moyennant un léger retard. Les projections actuelles attendent 1 100 MW installés en 2012, ce qui correspond à peu près à ce nombre d'installations.

Je partage l'avis énoncé concernant la recherche et le budget. Il faut effectivement augmenter ce budget même si nous sommes plutôt bien placés. Les Etats-Unis et l'Allemagne consentent des efforts largement supérieurs.

En Allemagne, un certain nombre d'entreprises comme Saint-Gobain se sont implantées pour bénéficier des aides accordées aux Länder d'ex-Allemagne de l'Est. Mais la France n'a pas accès à de telles aides européennes.

Concernant la qualité de l'électricité produite, celle-ci passe par un onduleur qui la transforme en courant alternatif tout à fait semblable à un autre. L'intérêt du photovoltaïque par rapport à l'éolien tient à la consommation sur place d'une partie de la production, ce qui a un impact modérateur sur les réseaux. La Californie oriente même ses panneaux non pour avoir la plus forte production, mais pour avoir la meilleure production au moment du pic de consommation, en soirée.

Au-delà du seuil de 3 kiloWatts crête, les producteurs sont considérés comme des commerçants, soumis à l'impôt sur les sociétés. Cette situation me semble normale.

Il faut effectivement traiter l'énergie photovoltaïque au regard de l'ensemble du bouquet énergétique. Mais il faut se positionner dès maintenant en fonction de la croissance et des développements attendus dans un avenir proche. A défaut, la filière française sera dépendante des produits étrangers.

L'introduction du rapport mentionne que les cellules photovoltaïques produisent une énergie propre, à l'exception peut-être de l'énergie nécessaire à leur propre fabrication qui est rattrapée en quelques années. En revanche, il peut y avoir une problématique spécifique au respect des paysages.

Il faut clarifier le régime fiscal de l'intégration au bâti en établissant un standard national, en évitant des divergences d'appréciation en fonction des régions. Les agriculteurs sont imposables sous conditions au régime des bénéfices agricoles.

Je note enfin l'interrogation relative à la distinction entre raccordement au réseau et extension du réseau. Je la mentionnerai dans le rapport car elle mérite une attention certaine.

M. le Président Patrick OLLIER. Avant de soumettre au vote de la commission l'autorisation de publication de ce rapport, j'estime que toutes les filières énergétiques sont compatibles avec la préservation des paysages. Je regrette les excès de précipitation imputables à la multiplication des incitations financières et à l'appât du gain. Mais j'ai confiance dans la sagesse humaine : on démonte des éoliennes au Danemark et l'Espagne tire les leçons de ses erreurs sur le photovoltaïque. Je suis sûr que les faits me donneront raison.

Les commissaires autorisent la publication du rapport à l'unanimité.

LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES

(LES AUDITIONS SONT PRÉSENTÉES DANS L'ORDRE CHRONOLOGIQUE DES SÉANCES TENUES PAR LA MISSION)

- M. Claude JEANDRON, directeur environnement et développement durable, EDF ;
- M. Jean-Louis BAL, directeur des énergies renouvelables de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- Mme Michèle PAPPALARDO, commissaire générale au développement durable
- M. Pierre-Frank CHEVET, directeur général énergie climat au ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire ;
- M. Jean-Pierre JOLY, chef du Département des technologies solaires – Institut national de l'énergie solaire (INES) ;
- M. CHROMETZKA, fédération des industries photovoltaïques et solaires – Bundesverband der Solarwirtschaft (Berlin, Allemagne) ;
- Mme Cornelia VIERTTEL, chargée de mission énergie solaire – Ministère fédéral de l'environnement (Allemagne) ;
- M. Anton MILNER, président-directeur général de Q-Cells (Berlin, Allemagne) ;
- M. Andreas UHLENHOFF, représentant de l'Agence fédérale de l'énergie – DENA (Allemagne) ;
- Professeur Wolfgang EBERHARDT, co-directeur du centre de recherche Helmholtz (Berlin, Allemagne) en structure de la matière et énergie ;
- M. Tomas DIAZ, directeur de communication et de relations internationales de l'Association de l'industrie photovoltaïque – Asociacion de la industria fotovoltaica (Madrid, Espagne) ;
- M. Antonio LUQUE LOPEZ, directeur de l'Institut d'énergie solaire de l'université polytechnique de Madrid (Espagne) ;

- M. Jose SIERRA LOPEZ, conseiller du conseil d’administration de la Commission nationale de l’énergie – Comision nacional de energia (Madrid, Espagne) ;
- Mme Marion HUET, directrice du pôle conseil en stratégie de Becitizen ;
- M. André ANTOLINI, président, M. Jean-Philippe ROUDIL, délégué général, M. Philippe CHARTIER, conseiller stratégie et recherche, M. Wael ELAMINE, responsable du dossier photovoltaïque, M. Alexandre de MONTESQUIOU, consultant, Syndicat des énergies renouvelables ;
- M. Daniel LINCOT, directeur du laboratoire d’électrochimie et de chimie de l’Ecole nationale supérieure de chimie de Paris ;
- Mme Esther PIVET, directrice adjointe marché de l’électricité et du gaz et M. Julien JANÈS, chef du département dispositifs de soutien aux énergies renouvelables et aux consommateurs, Commission de régulation de l’énergie ;
- M. Pâris MOURATOGLU, président du conseil d’administration et M. David CORCHIA, directeur général, d’EDF-Energie nouvelle ;
- M. Nabih CHERRADI, Empower Sun, et M. Jean-Pierre BOUQUET, maire de Vitry-le-François ;
- M. Christian BAILLEUX, ingénieur, Photosil ;
- M. Marc JEDLICZKA, directeur général de l’association Hespul ;
- Mme Claire TUTENUIT, présidente de Solsia Team ;
- M. Christophe POURREAU, chef du bureau de synthèse de la Direction de la législation fiscale, Mme GIREAU, M. Richard PARPAILLON, M. Thomas COLOMBAT, M. Raphaël MONTAGNER, ministère de l’Economie, de l’industrie et de l’emploi ;
- M. Bernard DELPECH, président d’EDF-ENR ;
- M. Wolfgang PALZ, président, World Council renewable energy Bonn/Paris ;
- M. Alain LIEBARD, directeur de l’Observatoire des énergies renouvelables ;
- M. Benoît RICHARD, directeur de Saint Gobain Solar ;
- Mme Sylvie RÉNIER, EDF, adjointe au directeur environnement et développement durable, EDF, M. Jean COTTAVE, directeur régional d’EDF, M. David AUGÉIX, directeur régional Grand Sud EDF-EN ;

- M. André JOFFRE, président du pôle de compétitivité Derbi – Développement des énergies renouvelables dans le bâtiment et l'industrie et M. Gilles CHARIER, directeur ;
- M. Jean-Michel FERRY, responsable photovoltaïque de la communauté d'agglomération de Perpignan Méditerranée ;
- M. Didier LANDAUD, président de Emix ;
- M. Jean-Louis ESTÈVES, directeur général de TCE Solar et M. Jacques PESSIAU, fédération française du bâtiment - union climatique de France ;
- M. Philippe MALBRANCHE, responsable du GENEC, CEA ;
- Mme Jacqueline LECOURTIER, directeur général et M. Pascal BAIN, responsable de programme au département énergie durable et environnement, Agence nationale de la recherche ;
- M. Philippe VEYAN, directeur général de Silpro ;
- M. Youenn DUPUIS, conseiller technique énergie climat, ministère de l'Écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire ;
- M. Bertrand DELCAMBRE, président et M. Jean-Christophe VISIER, directeur du département énergie-santé-environnement, centre scientifique et technique du bâtiment ;
- M. Stéphane PÉNET, directeur assurances dommages, Fédération française des sociétés d'assurance ;
- M. Olivier DUCROT, Systovi ;
- M. Daniel BOUR, président de Sunnco.

VISITES ET DÉPLACEMENTS EFFECTUÉS

Usines, centrales et centres de recherche

- Institut national de l'énergie solaire, Chambéry ;
- Usine Photowatt, Bourgoin-Jallieu ;
- Usine Tenesol, Toulouse ;

- Usine Photovoltech, Tienen (Belgique) ;
- Centrale solaire EDF-EN, Narbonne ;
- Pôle de compétitivité Derbi, Perpignan ;
- Bureau d'études Tecsol ;
- Institut des Matériaux, Nantes ;
- Laboratoire CNRS PROMES.

Déplacements internationaux

- Berlin, République fédérale allemande ;
- Madrid, Royaume d'Espagne.