

L'énergie photovoltaïque

Conseils et retours d'expériences en Bretagne

Rassemblons
nos

Énergies!

WWW.PLAN-ECO-ENERGIE-BRETAGNE.FR



Sommaire

1 INTRODUCTION

Le photovoltaïque, une énergie d'avenir	3
Comment ça fonctionne ?	3
Un guide pour qui, pourquoi ?	3

2 LES CONTEXTES ÉNERGÉTIQUES

International et national	4
Breton	4

3 LES APPELS À PROJETS PHOTOVOLTAÏQUES EN BRETAGNE

Bilan	5
Évolution des projets	6

4 DÉROULEMENT D'UN PROJET PHOTOVOLTAÏQUE

Organisation d'un projet	7
Les choix techniques	8
<ul style="list-style-type: none"> • « Faire du photovoltaïque pour un bâtiment et non faire un bâtiment pour faire du photovoltaïque » • Bien choisir son installateur • Comment dimensionner la taille de la centrale ? • Où positionner un système solaire ? • Quelle solution d'intégration possible ? • Choix de la technologie : cristallin ou couches minces ? • Quels résultats ? 	
Bilan économique et juridique	13
<ul style="list-style-type: none"> • Quelques chiffres clés • Le tarif d'achat • Fiscalité et impôt sur les sociétés 	
Banque et assurance	16
<ul style="list-style-type: none"> • Les banques • Les Assurances 	

Procédures ERDF/EDF AOA

- Demande
- Proposition
- Travaux
- Mise en service de l'installation
- Vente d'électricité
- Installations supérieures à 36 kVA

Exploitation du générateur et maintenance

- Les principaux problèmes et leurs solutions
- Entretien et maintenance : une garantie de performance

Communication

- Sensibiliser les générations futures
- Partager une expérience

5 MISE EN PERSPECTIVE DES PORTEURS DE PROJET BRETON

Impressions et ressentis	22
Impact du moratoire sur les projets	22

6 CONCLUSION

7 CONTACTS

8 TABLE DES FIGURES ET ILLUSTRATIONS

9 RÉFÉRENCES

10 GLOSSAIRE

11 ANNEXES

Le photovoltaïque, une énergie d'avenir

La terre reçoit, chaque année l'équivalent de 10 000 fois la consommation mondiale en énergie, grâce à l'irradiation du soleil. Cette ressource est donc inépuisable et à l'heure où le recours aux énergies fossiles est remis en cause, le photovoltaïque se développe de plus en plus.

Comment ça fonctionne ?

Les panneaux solaires photovoltaïques captent la lumière du soleil et transforment les photons reçus en courant électrique continu.

Les onduleurs transforment le courant continu en alternatif, qui, une fois sur le réseau, est redistribué à l'utilisateur.

Un guide pour qui, pourquoi ?

Le Conseil régional de Bretagne, l'ADEME et les 4 Conseils généraux ont aidé plusieurs installations photovoltaïques sur bâtiment en Bretagne entre 2008 et 2010 à travers des appels à projets. Ces partenaires ont alors décidé de réaliser un bilan de cette campagne d'aide et d'en publier les résultats sous la forme de ce guide pour partager l'analyse des porteurs de projets aidés et fournir un support à ceux qui veulent se lancer dans la production d'électricité solaire.

Ce guide s'appuie sur l'analyse des retours d'expérience et s'adresse à tout public intéressé par la production d'électricité d'origine solaire.

Les contextes énergétiques

International et national

Le protocole de Kyoto (adopté le 11 décembre 1997 et entré en vigueur le 16 février 2005) fixe à ses signataires des objectifs nationaux visant à réduire collectivement les émissions de gaz à effet de serre de 5,2 % entre 2008 et 2012 par rapport à 1990.

Au niveau européen, le Paquet Énergie Climat (adopté en décembre 2008 et entré en vigueur en juin 2009) propose une série de mesures afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre de l'Union Européenne de 20 % entre 1990 et 2020 (règle des « 3 x 20 » pour 2020).

Au niveau national, trois objectifs ont été adoptés :

- Réduire de 20 % les émissions de gaz à effet de serre en 2020 par rapport à 1990
- Améliorer de 20 % l'efficacité énergétique en 2020
- Augmenter à 23 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie finale totale.

La politique climatique de la France a été largement renforcée dans le cadre du Grenelle de l'Environnement afin de lui permettre de respecter ses engagements. Ainsi, la loi du 3 août 2009, dite « Grenelle 1 » fixe les grandes orientations en matière de lutte contre le changement climatique, et la loi « Grenelle 2 » développe les moyens pour y arriver. Concernant la production des énergies renouvelables une augmentation de 20 Mtep est prévue en 2020. L'atteinte de cet objectif nécessite entre autre, un fort développement de l'énergie photovoltaïque.

Breton

La Bretagne connaît une situation de fragilité électrique due à plusieurs facteurs :

- sa situation péninsulaire, d'où une fragilité des réseaux de transport
- sa faible production électrique (9,5 % seulement de la consommation, dont 60 % assurée par des énergies renouvelables)
- la forte croissance démographique corrélée au recours important au chauffage électrique

Pour apporter une réponse à cette situation, la Conférence bretonne de l'énergie a été mise en place le 19 janvier 2010. Cette instance réunit autour de l'État et de la Région, l'ADEME, les élus et parlementaires bretons, les opérateurs, les syndicats des énergies renouvelables, des représentants de réseaux économiques et associatifs.

Dans ce contexte, la Bretagne, s'est dotée le 14 décembre 2010 d'un « Pacte électrique » dont l'ambition est de répondre durablement aux défis auxquels elle se trouve confrontée en terme de sécurisation de son alimentation électrique pour les années à venir.

Le Pacte électrique breton repose de manière indissociable sur trois axes clés qui composent le « Triskel électrique breton » :

- Maîtrise de la demande en électricité (MDE)
- Développement des énergies nouvelles et renouvelables (ENR)
- Sécurisation de l'approvisionnement électrique

Pour chacun de ces trois piliers, des objectifs chiffrés et un plan d'actions multi partenarial ont été définis pour répondre durablement aux enjeux électriques de la Bretagne.

En particulier, le Pacte électrique engage les signataires à porter à 3 600 MW la puissance de production d'électricité renouvelable d'ici 2020, incluant 400 MW de photovoltaïque dont 300 MW sur bâtiment.

Les appels à projets photovoltaïques en Bretagne

Dans le cadre du développement de la filière photovoltaïque en Bretagne, des appels à projets ont été lancés à partir de 2008. Financés par le Conseil régional, les quatre Conseils généraux et l'Europe, et pilotés par l'ADEME, ils ont permis de subventionner 65 installations photovoltaïques en Bretagne en 3 ans, soit une puissance totale installée d'environ de 1,7 MW.

Axé principalement sur des critères de maîtrise de l'énergie la première année, le contenu de l'appel à projets a été modifié dans ses versions 2009 et 2010 pour mettre en avant l'utilisation de technologies innovantes. Elles concernent les modules (couches minces) ou leur intégration architecturale (brise-soleil, verrière, etc..).

En 2011, après trois ans d'expérience, il a été décidé de réaliser un bilan des installations aidées sur le plan technique, juridique et financier. Ce bilan a été réalisé en questionnant et en rencontrant les porteurs de projets lauréats des professionnels et d'autres acteurs de la filière.

Bilan

La figure 1 ci-dessous illustre la répartition des projets lauréats des appels à projets photovoltaïque selon le domaine d'activité du porteur de projet, et selon la technologie mise en œuvre.

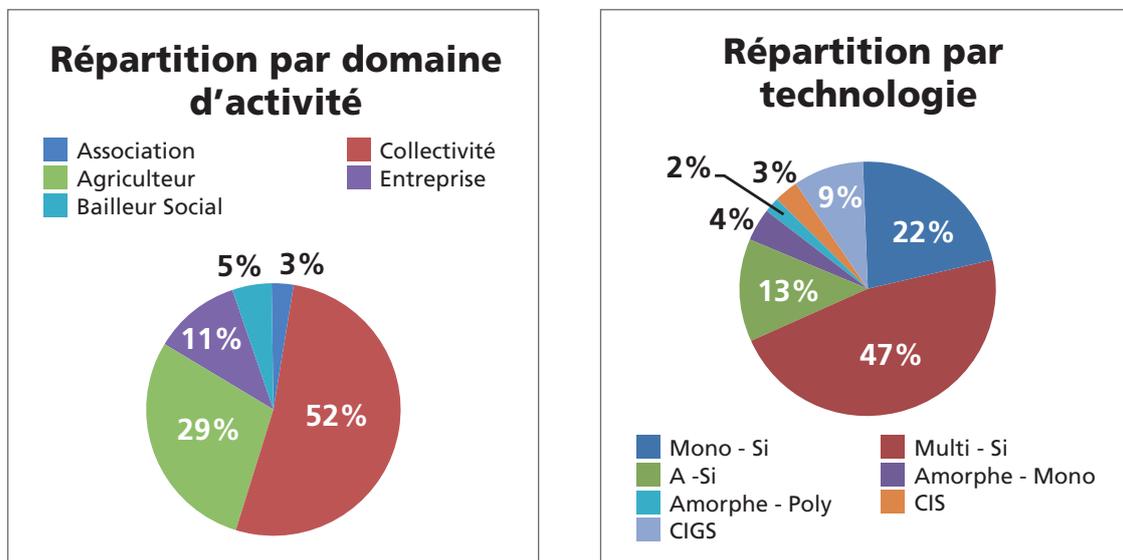


Figure 1 : Répartitions par activité du porteur du projet et par technologie de modules

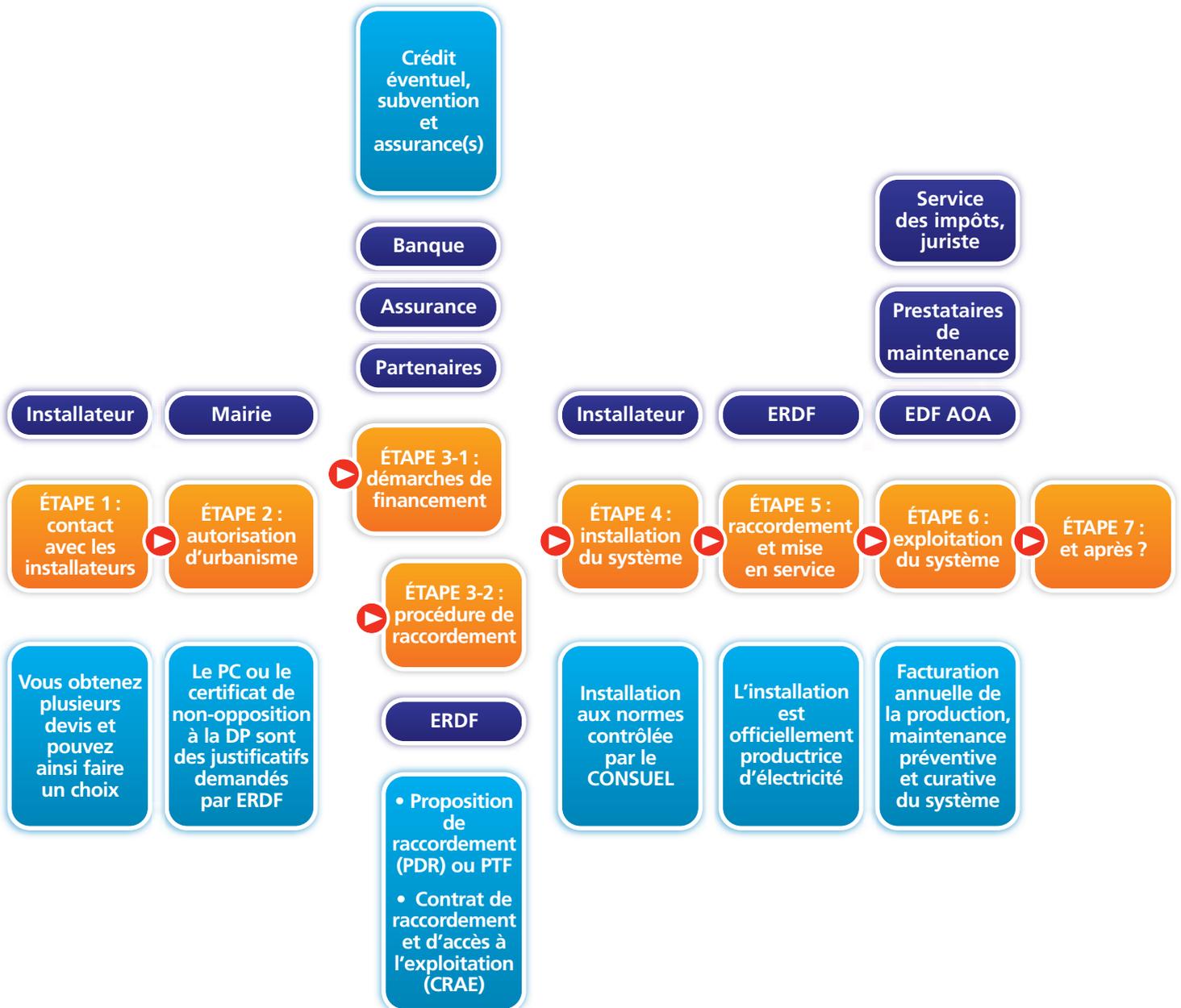
➤ Évolution des projets de l'Appel à projets

- Concernant le domaine d'activité, on remarque que les projets photovoltaïque agricoles, fortement représentés en 2008 se font moins nombreux en 2009 et 2010 laissant la place aux collectivités et aux entreprises. Ce changement s'explique par l'apparition des critères technologiques : les besoins photovoltaïques des agriculteurs concernent plus les grandes surfaces avec une sécurité de rendement, le cristallin étant, alors considéré comme le plus fiable.
- Les intégrations spécifiques représentent 50 % des projets lauréats 2009-2010. La majorité de ces projets concerne des Brise-soleil.
- Pour ce qui est des technologies, les lauréats ont majoritairement eu recours au cristallin (en toiture d'abord, puis pour les diverses intégrations hors toiture) mais la percée des technologies à couches minces se retrouve dans le graphe de la figure 1, puisqu'elles cumulent près de 31 % du nombre d'installations. En tête, on retrouve majoritairement les modules CIS et CIGS.
- On peut enfin noter que la répartition entre projets sur des bâtiments neufs ou existants est relativement équilibrée puisqu'on compte 46 % d'installations sur existant pour 54 % sur du neuf.

Les statistiques présentées dans le guide ont été établies grâce aux réponses des porteurs de projets lauréats ayant répondu à notre enquête.

Déroulement d'un projet photovoltaïque

Organisation d'un projet



Étape 1

Bien choisir son installateur c'est s'assurer de la performance et du bon fonctionnement du générateur photovoltaïque. Quelques règles de bases sont rappelées dans « Les choix techniques ».

Notez que, selon la puissance, le délai moyen entre signature d'un devis et début des travaux varie de quelques semaines à plusieurs mois.

Étape 2

Pour pouvoir raccorder une installation photovoltaïque, il faut faire une demande d'autorisation d'urbanisme en mairie (permis de construire -PC- ou déclaration préalable de travaux -DP-).

Une copie du PC ou du certificat de non-opposition à la DP est demandée dans le dossier de demande de raccordement.

Étape 3

L'obtention d'un prêt ou de subvention(s) peut prendre du temps. Certains justificatifs d'accord de prêts peuvent être demandés pour le raccordement², il convient donc de s'en préoccuper rapidement. Retrouvez les principales informations financières en dans « Les choix techniques ».

La procédure de raccordement prend également un temps certain. ERDF tente au mieux de limiter la file d'attente mais les démarches restent tout de même longues. De plus, c'est la date de dépôt du dossier complet de demande de raccordement qui définit le tarif d'achat qui évolue tous les trimestres, d'où l'importance de s'en préoccuper le plus tôt possible. Toutes les démarches de raccordement sont détaillées dans « Procédures ERDF / EDF AOA ».

Concernant les assurances, il se peut que votre demande soit plus ou moins longue, selon la connaissance de l'assureur, qui peut alors vous demander des informations complémentaires sur le matériel etc.

Étape 4

Lors de l'installation, et plus particulièrement sur des longs projets, il n'est pas étonnant que l'installateur propose de changer le choix du matériel, pour un équivalent de nouvelle génération au même prix, ou pour des problèmes d'approvisionnement.

Le CONSUEL, ou COmité National pour la Sécurité des Usagers de l'Electricité, est une association reconnue d'utilité publique chargée du visa d'attestation de conformité des installations électriques.

Étape 6

Une fois l'installation en service, il y a échange avec EDF Agence Obligation d'Achat (AOA) pour vendre la production.

Une installation photovoltaïque vit dans le temps, maintenance et entretien sont les maîtres mots d'un bon fonctionnement. Les informations essentielles sont dans « Exploitation du générateur et maintenance ».

Étape 7

Après 20 ans d'exploitation de l'installation, les modules peuvent encore fournir de l'électricité (au moins 80 %). Il existe alors plusieurs possibilités :

- Continuer à produire, et auto consommer ce qui peut encore être fourni grâce notamment à des solutions de gestion de l'énergie et de stockage
- Démanteler l'installation pour la réutiliser ailleurs
- Démonter et recycler les modules (via PVcycle par exemple)

L'info en +

En moyenne, les projets lauréats des appels à projets ont vu s'écouler un an entre la signature du devis et la mise en service finale de l'installation.

↳ Les choix techniques

« Faire du photovoltaïque pour un bâtiment et non faire un bâtiment pour faire du photovoltaïque »

Il est important de le rappeler, le photovoltaïque répond à un besoin, il n'est pas là pour le créer. La création d'une centrale photovoltaïque sur un bâtiment doit donc se faire en continuité d'une politique globale de maîtrise de l'énergie.

Qu'il s'agisse de rénover une toiture ou de créer un bâtiment, l'idée d'y installer du photovoltaïque doit être abordée au plus tôt pour permettre :

- une estimation de la surface d'exploitation possible (dimensions du bâtiment, exposition),
- une estimation des aménagements éventuels du bâtiment (renforcement de la structure par exemple)
- une estimation du potentiel productible (fonction de l'ensoleillement et de la technologie de modules) et donc de la viabilité économique du projet
- une intégration architecturale originale.

Le photovoltaïque n'est ni un placement financier ni un moyen de faire directement des économies d'énergie. Il s'agit d'un outil de production d'électricité locale et renouvelable. Il participe également au niveau régional à la réduction de la fragilité électrique du réseau breton.

Le projet participe alors à l'atteinte des objectifs de développement des énergies renouvelables pour réduire le recours aux énergies fossiles et atténuer les effets du changement climatique.

Bien choisir son installateur

Le choix de l'installateur et du matériel installé est une étape clé du projet. Il faut tenir compte de la qualification de l'entreprise, de son expérience dans le domaine (ne pas hésiter à demander des références), des hypothèses et données techniques prises en compte, de l'origine des modules et onduleurs proposés... etc.

Pour pouvoir faire ce choix, il est conseillé de demander plusieurs devis à différentes entreprises et de tenir compte des offres en options :

- réalisation des démarches de raccordement, installation, garanties,
- maintenance préventive et curative etc.

Les signes de reconnaissance Grenelle pour l'Environnement (qualifelec, qualipv, qualibat) assurent que l'installateur a été formé à l'installation de modules photovoltaïques. Notez qu'une entreprise sérieuse demandera systématiquement à voir le site avant de faire une proposition.

Comment dimensionner la taille de la centrale ?

Dans une région péninsulaire comme la Bretagne, qui importe près de 90 % de l'électricité qu'elle consomme, les productions décentralisées comme les installations photovoltaïques réduisent les pertes liées au transport.

Un bon dimensionnement tient d'abord compte des surfaces disponibles et des possibilités économiques.

↳ Bon à savoir

Le SER et la filière Photovoltaïque française ont lancé en juillet 2011 un label de qualité pour les modules et composants créés ou assemblés en France : AQPV

Où positionner un système solaire ?

Pour produire au mieux, il est préférable d'orienter les modules au sud, si possible avec une inclinaison de 30° par rapport à l'horizontale (en moyenne en France, cette donnée étant à affiner selon la localisation exacte de la centrale).

Si ce n'est pas le cas, il faut tenir compte d'un coefficient de correction lors de l'estimation de la production du générateur. Le tableau ci-dessous reprend les différents facteurs de correction. Les positions grisées sont à éviter si elles ne sont pas imposées par l'intégration architecturale (exemple du mur-rideau ou d'un garde-corps).

Tableau 1 : Coefficients d'inclinaison et orientation

INCLINAISON ORIENTATION	0°	30°	60°	90°
EST	0,93	0,90	0,78	0,55
SUD-EST	0,93	0,96	0,88	0,66
SUD	0,93	1,00	0,91	0,68
SUD-OUEST	0,93	0,96	0,88	0,66
OUEST	0,93	0,90	0,78	0,55



Lors du choix du site d'implantation du générateur photovoltaïque, il convient de prendre en compte les masques éventuels : la présence d'un arbre ou d'un bâtiment entre le soleil et les modules sont des points négatifs.

En effet, les modules, raccordés en série, sont sensibles à un ombrage, même partiel, qui réduit la tension (et donc la production) de tous les modules du système.

Il sera donc recherché en priorité des zones d'implantation ne souffrant d'aucune ombre sur la durée d'exploitation journalière, quelle que soit la saison.

Les données météo en Bretagne permettent d'escompter environ 1 d'enseillement annuel. Ainsi, au travers des résultats de la campagne de bilan des appels à projets photovoltaïques, **on observe des résultats supérieurs à 1 020 kWh/an par kWc installé**⁴. Une installation de 10 kWc peut donc fournir une moyenne d'environ 10 MWh par année de fonctionnement.

Néanmoins la production reste fortement dépendante des conditions météorologiques. Par exemple, en mars 2011, l'installation photovoltaïque du stade de Lorient a fourni environ 75 % d'énergie de plus⁵ que prévu initialement. A contrario un mois de juillet couvert sera a priori moins productif qu'espéré.

Globalement, les prévisions annuelles moyennes sont positives en Bretagne et les projets photovoltaïques produisent efficacement de l'électricité.

Ce qu'il faut retenir

Les 3 points clés sont :

- L'orientation au sud et l'inclinaison à 30°
- L'absence de masque
- Une production d'environ 1 000 kWh par an et par kWc installé

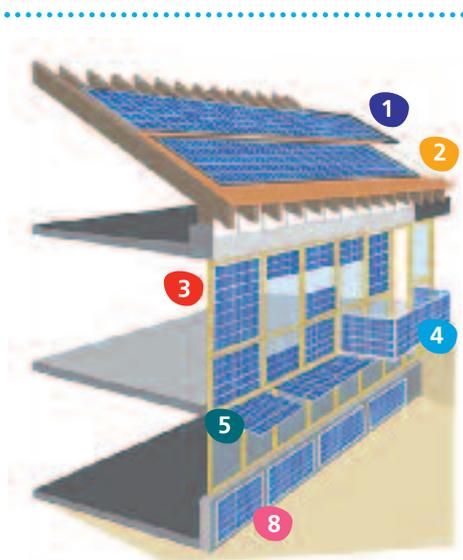
Pour calculer précisément le potentiel de votre installation, il existe des simulateurs en ligne comme PVGIS ou Calsol entre autres.

4. À moduler sur 20 ans en tenant compte des pertes de production des modules

5. Voir relevé de Lorient (en annexe 4)

Quelles solutions d'intégrations possibles ?

La meilleure intégration est celle qui répond au besoin de l'utilisateur du bâtiment.



Il existe 6 principaux types d'intégration :

- 1 Surimposition toiture
- 2 Intégration toiture
- 3 Mur-rideau (ou en verrière)
- 4 Garde-corps
- 5 Brise-soleil
- 8 Bardage (ou posé en toiture-terrasse ou dans un jardin)

La surimposition consiste à venir fixer les panneaux sur une toiture existante sans y toucher. Cette solution est couramment utilisée en Allemagne. En France, la surimposition de toiture ne bénéficie pas de la prime d'intégration, tout comme les systèmes n'assurant pas une fonction importante d'étanchéité ou autre (à l'image des bacs lestés en toiture terrasse).

A contrario, toute installation photovoltaïque assurant une fonction du bâtiment (assurer l'étanchéité, diminuer les apports de soleil à l'intérieur du bâtiment ou assurer la sécurité par exemple) peut bénéficier de la prime d'intégration.

Choix de la technologie : cristallin ou couches minces ?

Deux générations de produits se font actuellement face sur le marché mondial du photovoltaïque :

- D'un côté les modules de première génération, à base de cristaux de silicium (mono ou poly cristallin) nécessitent une quantité importante de matériaux semi-conducteur à la fabrication mais proposent actuellement les meilleurs résultats du marché en terme de rendement. Les cellules cristallines fonctionnent mieux lors d'ensoleillement direct.
- De l'autre côté on retrouve les technologies à couche mince (silicium amorphe, CIS, CIGS, CdTe... etc.) qui tiennent leur nom de la finesse de leurs couches d'éléments semi-conducteurs qui n'est pas du silicium, sauf pour l'amorphe.

Ces cellules présentent l'avantage de pouvoir se décliner sous la forme de panneaux classiques ou sous forme de film souple, déroulable facilement.

Ils sont aussi appréciés pour leur couleur noir uni présentant un intérêt architectural particulier et ont pour principale propriété de mieux supporter la chaleur et l'ensoleillement diffus.

**➤ Pour en savoir +
sur le matériel certifié**

Consultez la liste des Avis
Techniques et Pass Innovation

Chalet d'accueil de Botmeur,
module CIGS



Pour aller plus loin

L'annexe 1 synthèse des technologies reprend les différentes technologies de modules et d'intégration

Dans un pays aux climats aussi variés que la France, les deux technologies ont leur place :

Les régions du Sud privilégient les technologies cristallines grâce aux nombreuses heures d'ensoleillement direct dont elles disposent (à condition de bien ventiler les modules pour éviter toutes pertes dues à une surchauffe), quand les régions comme la Bretagne tendent plus à utiliser les technologies à couche mince qui produisent par temps couvert. Ce choix se révélant souvent judicieux.

Dans le cadre des appels à projets, la composante innovation technologique a permis à près de la moitié des projets lauréats 2009 et 2010 de choisir ces technologies couches minces. Les premiers résultats sont encourageants : par exemple, les modules CIGS installés sur le centre d'accueil touristique de Botmeur (29) produisent environ 950 kWh par kWc installé par an. Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux des panneaux polycristallins en brise-soleil du siège de la CC de Yeun Elez à Loqueffret qui fournissent 1 000 kWh/kWc.

Quels résultats ?

Les réponses lors de la campagne des appels à projets permettent, à titre indicatif de donner les résultats suivants :

ÉNERGIE PRODUITE EN FONCTION DE L'INTÉGRATION KWH/KWC	TOITURE	BRISE-SOLEIL	INTÉGRATION VERTICALE
MONOCRISTALLIN	1 025	1 000	N.A.
POLYCRISTALLIN	1 000	1 100	750
AMORPHE	1 000	N.A.	N.A.
CIS/CIGS/CDTE...	950	N.A.	N.A.

Production en fonction des technologies

Seuls les projets lauréats en 2008 permettent l'analyse d'un retour d'expérience sur plus d'une année complète. On constate en moyenne une surproduction de 10 à 15 % par rapport aux estimations et prévisions. De manière prospective, en considérant une perte de production de 20 % sur 20 ans⁶, le productible est correctement estimé en phase d'études :

- 1 000 kWh/kWc en moyenne
- les résultats des couches minces sont inférieurs mais cela est majoritairement dû à l'état de maturité des technologies lors de l'installation,
- les installations en brise-soleil produisent au moins grâce au surplus de ventilation

Ces résultats se basent la plupart du temps sur une seule année de production et pas forcément la même. Tous les projets ne se sont pas réalisés dans les meilleures conditions, certains générateurs sont par exemple affectés par des ombrages sur une partie de la journée (principalement le matin et/ou le soir). De plus, les modules installés en 2008 étant moins performants que ceux disponibles aujourd'hui, on trouve quelques disparités entre les projets 2008 et ceux de 2010. Pour être scientifiquement comparables, il faudrait tester les différentes solutions dans des conditions strictement identiques.

⁶ Garantie constructeur

👉 Bilan économique et juridique

Quelques chiffres clés

À L'INVESTISSEMENT

Le prix d'une installation dépend avant tout du matériel choisi et de son intégration. À titre d'exemple, il faut compter le double du prix pour des modules bi-verre intégrés dans les vitres comme le mur-rideau sur mesure de Loqueffret (ci-contre) par rapport à des modules polycristallins classiques. À cela il faut ajouter le coût de la main-d'œuvre pour la pose et les branchements, le raccordement, l'assurance et la maintenance.

Grâce à la campagne de bilan des appels à projets, nous avons pu établir le tableau 3 ci-dessous. On remarquera le prix moyen au Wc varie peu selon la technologie mise en œuvre. Cela s'explique principalement par l'évolution du marché du photovoltaïque dans le temps, les données traitées s'étalant sur trois ans.



Mur Rideau du siège de la Communauté de Communes de Yeun Elez - Loqueffret

	MIN	MAX	MOYEN
COUCHES MINCES	4,18 €/Wc	8,11 €/Wc	6,17 €/Wc
INTÉGRATION SPÉCIFIQUE	4 €/Wc	11,58 €/Wc	6,74 €/Wc
POLYCRISTALLIN EN TOITURE	5,13 €/Wc	7,78 €/Wc	6 €/Wc

Tableau 3 : Coûts du Wc des projets Lauréats (matériel, pose et raccordement)

À noter que le prix dépend de la puissance totale installée.

À titre d'information : l'annexe 3 propose un historique du prix de vente du Wc. On y observe notamment que la raréfaction de la ressource en silicium a joué un rôle important dans le coût des modules à partir de 2006 mais que l'arrivée des modules à couches minces en 2008 a relancé la course au prix bas (certains producteurs de panneaux annoncent des coûts de fabrication < 1 \$/Wc).

Le coût d'un raccordement est variable d'une installation à l'autre (proximité du poste source, puissance de l'installation, besoin de renforcement, etc.).

Pour les installations de puissance inférieure à 36 kWc et ne nécessitant pas de travaux spécifiques, il faut compter en moyenne 1 000 € pour le raccordement (pour plus d'informations, ERDF met à disposition sur son site un catalogue des prix pratiqués).

👉 Aujourd'hui

Comptez en moyenne entre 3,5 et 4 €/Wc pour une installation intégrée < 36 kW (en incluant le matériel de production, l'étanchéité, la pose, le raccordement...)

Pour les centrales de taille plus importante, il est courant d'avoisiner les 2,5 à 3 €/Wc selon les installateurs que nous avons interrogés

Pour mieux voir la rentabilité d'un projet, vous pouvez consulter les exemples de l'annexe 4 : tableur d'analyse financière, analyse des projets qui prennent un exemple de projet par an et par technologie. On remarquera que, malgré les changements de tarifs d'achat, les projets restent économiquement intéressants et que les temps de retour brut sont toujours voisins des 10 ans.

SUR LA DURÉE D'EXPLOITATION

Maintenance : pour anticiper le changement du (des) onduleurs(s) et toute maintenance inattendue (entretiens de modules, changement d'un composant défectueux, etc.), il est conseillé de provisionner environ 1 % du total investi par an.

Taxe : Tout producteur vendeur d'électricité doit s'acquitter annuellement d'une redevance dite « TURPE » Tarif d'Utilisation du Réseaux Public de Distribution d'Électricité dont le niveau est fixé par l'État et révisé régulièrement. Elle comprend une composante de gestion et une composante de comptage (redevances de location et d'entretien, de relève, de contrôle et de profilage). En 2011, il faut compter au minimum 51,24 € HT pour les installations de moins de 18 kVA, 54,96 € HT pour celles entre 18 et 36 kVA et 638,04 € HT pour celles supérieures à 36 kVA.

Autres charges : Les différentes charges fiscales sur l'activité commerciale représentent une part importante du bilan financier : il faut compter entre autre l'impôt sur les sociétés (33 % du bénéfice imposable) et la contribution économique territoriale (CET). Pour plus d'information sur ces démarches juridiques, il est préférable de se rapprocher d'un juriste ou d'entrer en contact avec le service des impôts.

Le tarif d'achat

Depuis 2000 et la libération du marché de l'énergie, il est possible de vendre la production d'énergie photovoltaïque à n'importe quel acheteur obligé. L'acheteur est l'organisme soumis par décret à l'obligation d'acheter l'énergie photovoltaïque produite sur le territoire national. Seul EDF et les Entreprises Locales de Distribution (ELD, régies locales) sont soumises à l'obligation d'achat. Le tarif est fixé par des arrêtés tarifaires et le surcoût lié à l'obligation d'achat est compensé par la Contribution au Service Public d'Électricité (CSPE).

↳ Rappel

Le tarif d'achat, pour qui ?

« D'une manière générale, toute personne morale peut, quelle que soit la mission pour laquelle elle a été constituée, exploiter une installation de production d'électricité photovoltaïque, dont les générateurs sont fixés ou intégrés aux bâtiments dont elle est propriétaire et bénéficiaire de l'obligation d'achat (sous réserve, pour l'État et ses établissements publics, de l'accord du ministre chargé de l'énergie). »

Loi Grenelle 2 - Article 88

Le contrat est signé pour une durée de 20 ans et le tarif est réévalué chaque année pour tenir compte de l'inflation (en moyenne 2 %). Chaque année, peu avant la date d'anniversaire, l'acheteur est tenu de communiquer les valeurs à prendre en compte pour le calcul du tarif d'achat actualisé.

L'énergie susceptible d'être achetée est plafonnée à l'équivalent de 1 500 heures de production à pleine puissance en métropole (1 800 heures dans les DOM et en Corse).

La demande de contrat d'achat est maintenant intégrée dans la demande de raccordement au gestionnaire de réseau (pour les cas gérés par ERDF et EDF AOA).

Notez également que la date de dépôt du dossier complet de demande de raccordement détermine le trimestre dans lequel est attribué le tarif d'achat (cf. Arrêté tarifaire du 4 mars 2011). De plus, le contrat d'achat prend effet à la date de mise en service de l'installation.

L'exemple type :

Si un producteur, comme c'est le cas pour l'ESAT de Glomel, est raccordé en août 2010, mais ne reçoit son contrat d'achat qu'en juin 2011, les kWh produits depuis août seront achetés par EDF AOA car c'est la date de mise en service qui prévaut.

Le Système de tarif d'achat actuellement en place se base sur sept tarifs différents selon la puissance et l'utilisation du bâtiment. Ces tarifs sont ajustés tous les trois mois en fonction du total de puissance des demandes de raccordement.

Par ailleurs, pour les installations de + de 100 kWc, ont été mis en place des appels d'offres. Pour plus d'informations, consultez le site de la CRE = Commission de régulation de l'énergie.

Pour aller plus loin

L'annexe 2 : « Tarif d'achat photovoltaïque – mars 2011 » développe précisément les méthodes d'application des tarifs et de leurs évolutions trimestrielles.

L'annexe 3 reprend également l'évolution du tarif d'achat du kWh photovoltaïque.

Fiscalité et impôt sur les sociétés

Comme tous revenus, la vente de l'électricité photovoltaïque pour les installations supérieures à 3 kWc est soumise à l'Impôt sur les Sociétés, quel que soit le statut du propriétaire de l'installation.

Cas spécifiques, il existe pour les agriculteurs un système qui permet une exonération partielle, ainsi que pour les entreprises nouvellement créées. Plus de détails sont disponibles sur le site <http://www.photovoltaique.info/> (créé par Hespul et l'ADEME)

Concernant le cas des collectivités, l'annexe 7 présente la réponse du ministre de l'énergie à une question concernant l'explication des articles du code des impôts.

Cas particulier

Le photovoltaïque étant une vente d'électricité, cela entraîne l'assujettissement des collectivités à la TVA pour cette activité.

Pour toutes les questions de fiscalités, il est conseillé de se renseigner auprès du service des impôts et si besoin d'un juriste.

☛ Banque et assurance

Les banques

Sur la période des appels à projets menés en Bretagne, il n'apparaît pas de problèmes particuliers dans l'organisation des plans de financement des projets. 95 % des lauréats ont répondu ne pas avoir rencontré de problèmes. Un tiers d'entre eux ont eu recours à un emprunt bancaire spécialement dédié au système photovoltaïque et 3 organismes bancaires ressortent le plus souvent. On notera que les projets ayant bénéficié d'un prêt annoncent un TRB inférieur à 12 ans.

ATTENTION : le coût du crédit est à inclure dans le calcul de rentabilité d'un projet.

La situation actuelle (post-moratoire) change un peu la donne. Le nouveau système tarifaire imposant une mise à jour trimestrielle du prix d'achat du contrat, les organismes prêteurs sont plus prudents et demandent parfois un apport plus important et des garanties solides. La présentation aux banques d'une première analyse de rentabilité économique peut être un argument convaincant lors de négociations. Le tableur de l'annexe 4, cité dans le chapitre précédent, permet de faire rapidement une telle étude.



L'installation de Redon

Les Assurances

Il existe deux types d'assurance pour le photovoltaïque :

- **L'Assurance Dommages aux Biens** protège le matériel. Dans le cas d'une installation intégrée au bâti, le générateur photovoltaïque est reconnu comme faisant partie du bâtiment, il faut donc à ce titre l'intégrer au contrat multirisque. Ainsi, en cas d'incendie ou de bris de glace, l'installation sera remplacée à neuf, ou avec application d'un degré de vétusté, au même titre que le reste du bâtiment (selon les termes de votre contrat d'assurance).

Retour d'expérience :

Dans un cas comme celui du centre d'accueil de Redon ce genre d'assurance est bienvenu : L'installation s'est vue pillée de 38 de ses 90 modules moins d'un an après leur pose. La remise en état de l'installation a donc été prise en charge par l'assurance et l'installateur a mis en place un système communiquant qui alerte le producteur en cas de production anormale (alerte par sms).

- **L'assurance responsabilité civile (écrit comme l'assurance dommages aux biens)** : si l'installation photovoltaïque est raccordée au réseau public de distribution, il est possible qu'elle soit la cause d'un accident : l'électrification d'une personne suite au non-fonctionnement de la protection de découplage de l'onduleur qui permettrait à l'installation photovoltaïque de maintenir le réseau sous tension alors qu'il devrait être coupé (c'est ce que l'on appelle l'îlotage). Cette situation est fortement improbable mais il est quand même demandé au propriétaire du générateur solaire de souscrire une **assurance responsabilité civile** couvrant ce risque.

Close spécifique :

Pour assurer une rente de production, il est possible d'inclure dans votre contrat une close incluant le remboursement de l'énergie non produite en cas de défaut de l'installation (défaillance d'un module, incendie etc.) Mais l'assurance ne protège en aucun cas contre la mauvaise météo.

👉 Procédures ERDF/EDF AOA

Le raccordement est une prestation réalisée par ERDF (ou sous-traitant). Le raccordement consiste à réaliser le branchement de l'installation sur le réseau (ou la modification du branchement sur un site déjà raccordé en consommation) et, le cas échéant, l'extension du réseau.

Ce chapitre reprend les étapes clés d'un raccordement réussi.

👉 Bon à savoir

Il est important de décider si la production d'électricité sera vendue en totalité ou partiellement (après déduction des besoins domestiques). En effet, les modalités techniques de raccordement diffèrent selon le choix. Attention à suivre de près le bon déroulement de la procédure.

Demande

Pour entreprendre le raccordement d'une installation photovoltaïque, il faut d'abord constituer un dossier dès le choix de l'installateur fait. Ce dossier comprend un formulaire à renseigner⁷ et des documents à fournir (précisés à la fin du formulaire) en particulier :

- L'autorisation d'urbanisme (selon les cas, certificat de non-opposition de la mairie au projet, arrêté de permis de construire ou simple récépissé de déclaration préalable)
- le plan de situation du projet d'installation de production, accompagné si possible de photographies de votre branchement actuel,
- l'accord de rattachement de l'Entreprise Locale de Distribution (si le projet se situe sur le territoire d'une ELD).

Cette demande de raccordement peut se faire à l'aide d'un dossier papier disponible sur le site Internet d'ERDF.

Proposition

Une fois ce dossier complet, ERDF l'étudie et vous envoie une proposition technique et financière de raccordement (PDR) avec ou sans extension de réseau, **dans un délai maximum de 6 semaines** (sans extension) à **3 mois** (en cas de nécessité de travaux). Ce document est accompagné d'un Contrat de Raccordement, d'Accès au Réseau et d'Exploitation (CRAE).

Si le choix a été fait de recourir à l'offre Obligation d'Achat d'EDF, ERDF transmet directement les éléments nécessaires à l'établissement du contrat.

La PDR est valable 3 mois. Pour l'accepter, il faut retourner à ERDF :

- la proposition et le contrat signés, accompagnés du règlement de l'acompte demandé,
- la date à laquelle les travaux d'aménagement demandés éventuellement par ERDF pour réaliser le raccordement seront achevés.

⁷ Formulaire à renseigner

Travaux

Si la totalité de la production est vendue, il faut poser un disjoncteur et 2 compteurs spécifiques (compteurs de production et de non-consommation).

Si seul le surplus de la production est vendu, il suffira d'ajouter un compteur de production.

Si le local technique abritant les compteurs électriques est déjà raccordé au réseau de distribution (cas d'un bâtiment existant) : ERDF fait son possible pour s'adapter à l'existant et ne pas avoir de travaux importants à réaliser.

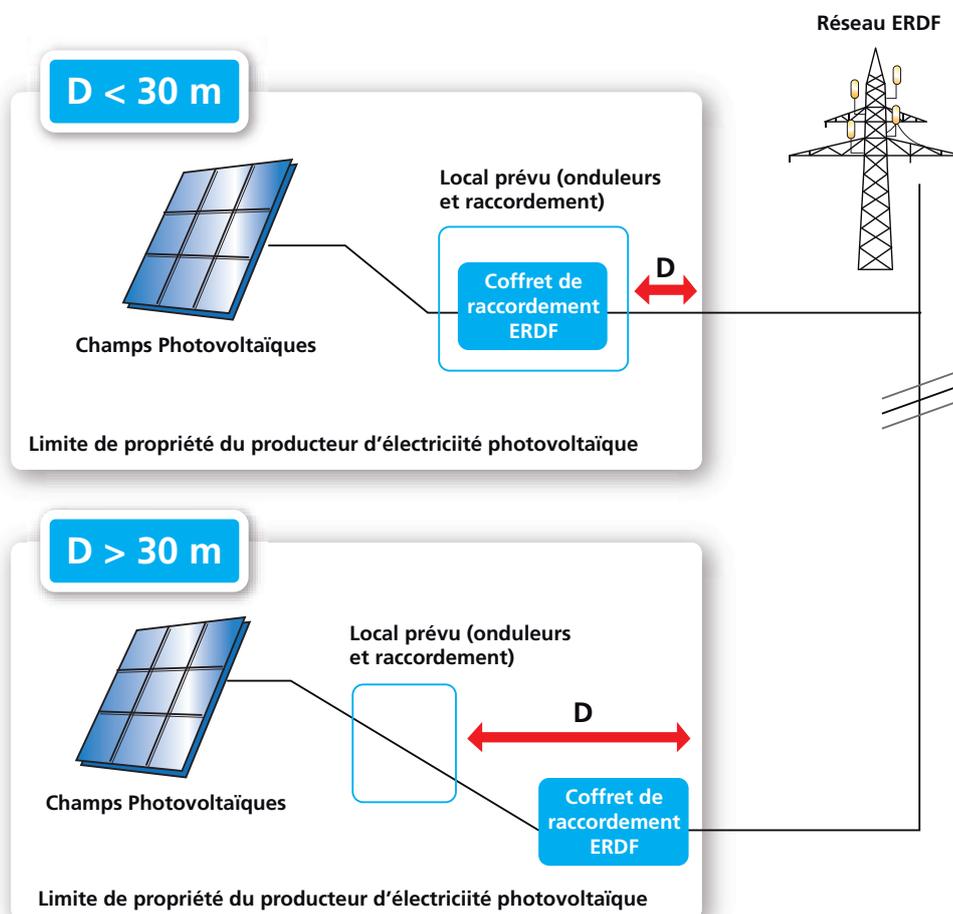
Pour aller plus loin

Les schémas des installations électriques des deux cas sont en annexe VI.

Si le local technique n'est pas encore raccordé au réseau électrique (cas des bâtiments neufs) :

- S'il y a moins de 30 m entre la limite de la propriété et le local, alors ERDF réalise les travaux nécessaires au branchement jusqu'au local. Il restera alors à la charge du maître d'ouvrage, la réalisation de la tranchée où passera le câble de branchement.
- S'il y a plus de 30 m entre la limite de la propriété et le local : ERDF installe les éléments nécessaires (compteur et disjoncteur, notamment) à votre branchement en limite de propriété. Le maître d'ouvrage est alors responsable de la réalisation des travaux permettant de relier ces éléments à son installation de production.

schéma de localisation du coffret de raccordement



Mise en service de l'installation

La mise en service de votre installation de production sera effectuée une fois :

- les travaux de raccordement réalisés par ERDF
- l'installation de production achevée et raccordée par un électricien au disjoncteur production dans le cas d'une vente de la totalité de l'électricité produite ou un tableau de répartition dans les autres cas
- les frais de raccordement réglés à ERDF
- l'attestation de conformité de votre installation établie par un électricien et visée par le Comité National pour la Sécurité des Usagers de l'Électricité (CONSUEL)

Il faut alors contacter ERDF pour convenir d'une date de mise en service. Un délai moyen de 10 jours ouvrés est souvent nécessaire.

Le Contrat de Raccordement, d'Accès et d'Exploitation (CRAE) et le contrat d'achat d'électricité (par EDF AOA ou votre ELD) entre en vigueur le jour de la mise en service.

Le cas Particulier des ELD

En France, près de 160 ELD fournissent environ 5 % de l'énergie électrique dans près de 2 800 communes (5 % du territoire) et desservent 3,5 millions d'habitants (5 % de la population).

Toutes les ELD sur le site répertoire des ELD

Si l'installation est réalisée sur le territoire d'une ELD (cela concerne 5 % du territoire français), toutes les démarches pour le contrat d'achat seront à faire auprès de l'ELD en question. La procédure pourra alors être sensiblement différente, il faut donc contacter la régie pour s'assurer de la marche à suivre.

Vente d'électricité

En moyenne, six mois s'écoulent avant réception du contrat d'achat d'électricité par EDF AOA, des relances pour s'assurer que le dossier est complet peuvent s'avérer utiles. Comme annoncé précédemment, c'est la date de mise en service qui vaut début du contrat. L'énergie produite entre la mise en service et la réception du contrat est tout de même facturée.

Peu avant la date de facturation, l'acheteur adressera au maître d'ouvrage un modèle de facture comprenant la valeur des indices à utiliser pour le calcul du tarif d'achat.

Si l'électricité à Edf, la facture peut être réalisée en ligne sur le site web d'[EDF OA Solaire](#).

Installations supérieures à 36kVA

La procédure est sensiblement la même pour les installations de puissances comprises entre 36 et 250 kWc. L'intégralité des démarches est détaillée sur le Site d'ERDF.

Les raccordements de puissances comprises entre 250 kWc et 12 MWc se font en Haute Tension. Pour les installations de production d'une puissance > 12 MWc, le raccordement se fait auprès de RTE.

Pour aller plus loin

Le Syndicat des Énergies Renouvelables (SER) a publié une étude portant sur les enjeux du raccordement de l'électricité photovoltaïque

☛ Exploitation du générateur et maintenance

Principaux problèmes et leurs solutions

La capacité des modules à fournir de la puissance diminue au fil du temps. Les producteurs de panneaux photovoltaïques garantissent aujourd'hui une baisse maximale de la puissance d'origine de 20 % sur 20 ans.

L'onduleur, quant à lui a une durée de vie de 10 ans. Il faut alors prévoir de le changer au moins une fois sur les 20 ans de production. S'agissant d'électronique sensible aux fortes chaleurs, il convient de placer le(s) onduleurs dans un endroit ventilé, pour éviter une détérioration prématurée du matériel.

Dans le cas d'une variation importante de la production par rapport à l'estimatif ou aux résultats des années précédentes, plusieurs facteurs peuvent entrer en jeu :

- la présence de masques : l'étude de potentiel doit intégrer les éléments susceptibles de générer des ombres portées sur les modules, les privant ainsi de production. Par ailleurs, la croissance d'un arbre ou la construction d'un bâtiment entre le soleil et les modules entraîneront également une baisse de la production.
- un dépôt de poussière : si les précipitations locales ne suffisent pas à les nettoyer, les modules peuvent recevoir moins d'énergie solaire que prévue. La production d'électricité photovoltaïque en est donc aussi dégradée. Un simple nettoyage à l'eau, annuel ou biennuel est alors recommandé.

☛ Cas concret

Lors du festival interceltique de Lorient, des feux d'artifice sont tirés depuis le stade, dont la tribune sud est recouverte de membranes solaires. Afin d'éviter toute détérioration, un système d'arrosage constant du système lors de l'événement a été instauré.



*Stade de Lorient,
518 m² d'amorphe, 32.64 kWc*

Entretien et maintenance : une garantie de performance

Comme tout système en extérieur, les modules photovoltaïques sont exposés aux aléas climatiques (canicules, orages, grêle, etc.), aux activités alentours et à la vie de la faune locale. Le suivi d'une installation est donc un élément clé de son bon fonctionnement et permet d'éviter bien des surprises.

La plupart des installateurs proposent un service de maintenance préventive souvent à plusieurs niveaux (contrôle de l'installation électrique, contrôle des modules, nettoyage etc.) pour un budget d'environ 1 % du montant de l'investissement global par an.



Panneau d'affichage relié aux onduleurs, EHPAD de Vezin-le-coquet

L'utilisation d'un système de renvoi des informations des onduleurs sur un ordinateur ou un panneau d'affichage peut s'avérer utile. Il permettra de contrôler que la production au jour le jour ou sur une période donnée est correcte.

👉 Sensibilisation, partage d'expériences

Sensibiliser les générations futures

L'électricité d'origine photovoltaïque est une énergie d'avenir puisque inépuisable à l'échelle humaine. Si on veut que son usage se banalise et que chacun prenne conscience des enjeux, il est crucial de sensibiliser un maximum de personnes et ce dès le plus jeune âge. Expliquer aux enfants d'un centre de vacances ce que sont les grands panneaux bleus sur le toit est un exemple parmi tant d'autres qui peut les sensibiliser à l'usage de l'énergie du soleil pour produire la lumière des locaux qu'ils utilisent etc.

Partager une expérience

Que ce soit les parents des enfants d'un pôle enfance, les clients d'une entreprise, les partenaires d'un agriculteur, les élus d'une commune voisine ou qui que ce soit d'autre, le photovoltaïque fait et doit faire parler de lui. Un simple échange peut confirmer ou infirmer les projets, envies ou interrogations de chacun vis-à-vis de l'installation d'un générateur solaire.

L'installation d'un panneau d'affichage de la production en temps réel est un outil de communication simple et efficace. Reliés aux onduleurs, ces panneaux peuvent afficher l'énergie produite sur la journée, celle produite en instantané, celle produite depuis la mise en service, ou encore les économies de CO2 réalisées.

Mise en perspective des porteurs de projet breton

👉 Organisation d'un projet

Les différents candidats aux appels à projets, qu'ils soient lauréats ou non, ont pour la plupart mené leurs projets à bien, et ce dans une volonté pérenne de maîtrise de l'énergie.

Pour la plupart des porteurs de projets interrogés, l'aide financière est le coup de pouce qui les a motivés dans leur démarche d'innovation.

Globalement, tous sont satisfaits de leurs installations, et des résultats obtenus, tant dans la production d'énergie que dans l'intégration (étanchéité des toitures, fonction de brise-soleil etc.). Tous s'accordent également à dire que le côté innovant de leur installation (technologie de modules ou intégration) est un véritable plus.

👉 Impact du moratoire sur les projets

Les professionnels que nous avons rencontrés restent mobilisés pour faire du solaire l'une des énergies de demain tout en diversifiant leur activité suite au moratoire. Par ailleurs, lors de nos visites nous en avons aussi rencontré qui sont arrivés tardivement dans le domaine du photovoltaïque et qui essayent d'en développer l'activité.

L'essor du photovoltaïque en France et son accroissement fulgurant en 2010 ont donné lieu à un moratoire de trois mois avec effet rétroactif sur les projets de plus de 3 kWc, le temps de définir un nouveau cadre mieux adapté à la baisse des prix des matériaux et moins ouvert à la spéculation. Suspendant l'obligation d'achat et par la même les raccordements, le moratoire a surtout impacté de par sa rétroactivité, laissant un certain nombre de projets dans un vide juridique.

Suite à cette période, un arrêté tarifaire a défini :

- Un nouveau système de tarif d'achat auto ajusté tous les 3 mois pour les projets inférieurs à 100 kWc. L'évolution du tarif est basée sur la puissance cumulée des demandes de raccordement du trimestre précédent (cf. Annexe I)
- Une procédure d'appels d'offres nationaux pour les porteurs de projets de plus de 100kWc. Les lauréats peuvent bénéficier d'un tarif plus intéressant que les 12 cts/kWh de base

Aujourd'hui la filière s'organise avec les nouvelles règles du jeu, au travers d'initiatives comme celle du Syndicat des Énergies Renouvelables (SER) qui a lancé le label AQPV (Alliance Qualité Photovoltaïque), créé dans le but de faire connaître les industries françaises qui fabriquent les composants semi-conducteurs ou encapsulent leurs panneaux en France. Moins restrictif que le « made in France » (qui impose 45 % de valeurs ajoutées sur le territoire français), AQPV permet la reconnaissance d'un savoir faire de qualité et de capacités françaises pour lutter contre le monopole des produits asiatiques à bas prix qui inondent encore aujourd'hui le marché français et pour lesquels le service après-vente n'est pas toujours de qualité.

Conclusion

Les appels à projets photovoltaïques ont donné un nouvel élan au photovoltaïque en Bretagne : celui de l'innovation. Grâce à cette initiative, la région et ses installateurs disposent aujourd'hui de références technologiques (modules ou intégration) et d'un panel d'installations dont les relevés de performances à long terme pourront prouver aux plus réticents l'efficacité du photovoltaïque en Bretagne.

L'évolution du marché, son expansion ces dernières années, et le développement de la filière photovoltaïque bretonne sont autant d'outils pour valoriser l'énergie solaire.

De plus, les analyses ont montré que malgré les a priori, la Bretagne a sa part de soleil, et n'a rien à envier à d'autres régions sur le plan des performances photovoltaïques.

Le gisement solaire est donc bien là, reste à l'exploiter.

Un grand merci à l'ensemble des lauréats qui ont bien voulu répondre aux questions, aux maîtres d'ouvrage et aux professionnels qui ont pris le temps de nous rencontrer.

Contacts

➤ Qui consulter au cours du projet :

- Les Espace Info Énergie (particuliers) / Conseiller en Énergie Partagée (collectivités) pour choisir
- ERDF pour le raccordement
- L'ADEME
- Le Conseil Régional de Bretagne
- Les Conseils généraux des Côtes d'Armor, du Finistère, d'Ille-et-Vilaine et du Morbihan
- Le site photovoltaïque.info (créé par Hespul et l'ADEME) qui regroupe la majorité des informations à connaître
- La Chambre Régionale d'Agriculture
- La Confédération de l'Artisanat et des Petites Entreprises du Bâtiment (CAPEB)
- La Fédération Française du Bâtiment (FFB)
- Qualit'ENR, Qualibat, Qualifelec...

Références

1. Loi n°2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement (loi grenelle 2) - Article 88
2. Mode d'emploi pour le raccordement de votre installation de production pour les puissances inférieures ou égales à 36 kVA, édité par ERDF en avril 2011
3. Arrêté du 4 mars 2011 fixant les conditions d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie radiative du soleil telles que visées au 3° de l'article 2 du décret n° 2000-1196 du 6 décembre 2000
4. <http://www.photovoltaique.info>

Glossaire

- 1. **CEP** : Conseiller en Énergie Partagé. Ces personnes apportent un conseil objectif aux communes qui souhaitent réaliser des actions de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables.
- 2. **EIE** : Espace Info Énergie. Ces personnes apportent un conseil objectif aux particuliers qui souhaitent réaliser des actions de maîtrise de l'énergie et de développement des énergies renouvelables.
- 3. **EDF AOA** : EDF Agence Obligation d'Achat
- 4. **EDL** : Entreprise locale de distribution
- 5. **Énergie produite** : L'énergie est une puissance dans le temps. Le Wh est l'unité qui compte le nombre de W produit sur une période d'une heure.
- 6. **EnR** : Énergie renouvelable
- 7. **ERDF** : Électricité Réseau de Distribution France est l'entreprise qui exploite près de 95 % du réseau de distribution français. ERDF est une filiale à 100 % d'EDF.
- 8. **PTF** : Proposition Technique et Financière. Il s'agit de la proposition technique et financière par ERDF à un porteur de projet photovoltaïque pour raccorder son installation au réseau électrique.
- 9. **Puissance crête** : Valeur de référence permettant de comparer les puissances des panneaux entre elles. La puissance crête est obtenue par des tests effectués en laboratoire, sous une irradiation de 1 000 W/m², une température de 25°, la lumière ayant le spectre attendu pour une pression atmosphérique de 1,5 AM. Elle s'exprime en Watt crête (Wc)
- 10. **PV** : Photovoltaïque
- 11. **RTE** : Réseau électricité de France
- 12. **SER** : Syndicat des énergies renouvelables. Il s'agit du syndicat qui regroupe la plupart des professionnels du secteur des énergies renouvelable dont le photovoltaïque.
- 13. **TRB** : Temps de Retour Brut.

Annexes

1. Synthèse des technologies
2. Les Tarifs d'achat, décret du 4 mars 2011
3. Tableur d'analyse financière, analyse des projets
4. Relevés de l'installation photovoltaïque de Lorient : août 2010-mars 2011
5. Schémas de raccordement

Annexe 1

ÉTAT DES LIEUX DU PHOTOVOLTAÏQUE : SYNTHÈSE DES TECHNOLOGIES

Découvert par Antoine Becquerel, à la fin du XIX^e siècle, l'effet photovoltaïque transforme la lumière solaire en énergie électrique.

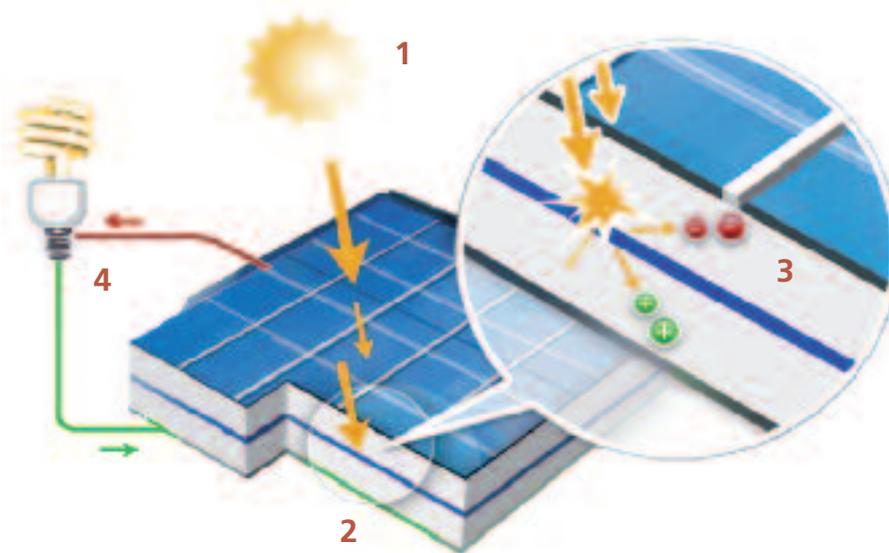
La production des premières cellules photovoltaïques débute en 1914 pour les posemètres utilisés en photographie et 40 ans plus tard (en 1954) pour une production électrique.

Deux technologies, le silicium cristallin et les cellules à couche mince, dominent actuellement le marché. L'amélioration de la performance du photovoltaïque fait l'objet d'efforts soutenus et en très nette croissance de la part de plusieurs pays (Japon, États-Unis, Allemagne... voir même en France).

Le principe de l'effet photovoltaïque est le suivant (cf. figure 1) :

1. Les "grains de lumière"- les photons - heurtent la surface du semi-conducteur disposé en cellules ou en couche mince.
2. Ils transfèrent leur énergie aux électrons présents dans la matière qui se mettent alors en mouvement dans une direction particulière.
3. Le courant électrique continu qui se crée est alors recueilli par des fils métalliques très fins connectés les uns aux autres et acheminé à la cellule suivante.
4. Le courant s'additionne en passant d'une cellule à l'autre jusqu'aux bornes de connexion du panneau, et il peut ensuite s'additionner à celui des autres panneaux raccordés en "champs".

Figure 1 : L'effet photovoltaïque



LEXIQUE

- Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité.
- Énergie grise : c'est l'énergie utile à la conception, la production, la fabrication, l'utilisation et le recyclage d'un produit industriel.
- η (= Rendement) : on nomme rendement le quotient de l'énergie électrique obtenue par celle fournie par le soleil au panneau.
- W_c (= Watt crête) : c'est la puissance électrique maximale pouvant être fournie dans des conditions standards (un ensoleillement de 1 000 W/m² ; une température des panneaux de 25 °C ; une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1.5)
- Rayonnement direct/diffus : Le rayonnement direct est celui qui provient en ligne droite du soleil par temps clair. Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les nuages et les molécules diverses en suspension dans l'atmosphère, et de sa réfraction par le sol.

LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE MODULES

A. Les technologies de 1^{ère} génération

Les cellules de première génération sont basées sur une seule zone d'échange d'électrons entre la couche de semi-conducteur dopée positivement et celle dopée négativement (jonction de type p-n) et utilisent le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté (en moyenne 80-90 % de silicium « solaire »).

Cette technologie se décline sous deux formes principales :

- **Le silicium monocristallin** (Mono – Si) est un matériau pur à 99,999 % qui se présente sous la forme d'un cristal unique de grande dimension (cf. figure 2). Découpé en wafers (fines tranches) assemblés en modules, il affiche les meilleurs rendements sur le marché des produits actuellement disponibles (environ 15-20 %).
- **Le silicium polycristallin** (Multi – Si), plus répandu car moins cher à produire, est composé de plusieurs cristaux juxtaposés (cf. figure 3). Une fois fondu, le bloc obtenu est tranché en wafers qui sont assemblés de la même façon qu'en monocristallin. Le rendement de ces modules est généralement compris entre 12 et 15 %.

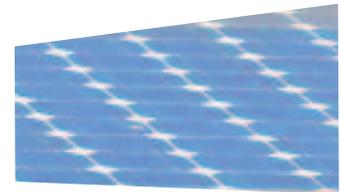


Figure 2 :
Cellules monocristallin

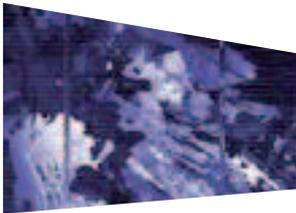


Figure 3 :
Cellule polycristallin

- **Le silicium en ruban** (EFG) : Cette technique permet de s'affranchir des lingots et de la perte de silicium lors de la découpe. Il s'agit de cristalliser du silicium fondu (quelques dizaines de micromètre) sur un ruban souple. La consommation de silicium est divisée par deux (8 g par Wc contre 16 g par Wc). La solution est testée de longue date et industrialisée par certains fabricants (RWE et Evergreen) et offre des rendements équivalents au polycristallin.

B. Les technologies de 2^e génération

Outre le silicium amorphe qui fait le lien entre les deux grandes catégories, les recherches dans le domaine des matériaux semi-conducteurs ont conduit à l'apparition d'une diversité de technologies utilisant des complexes de matériaux en couches minces. L'épaisseur moyenne de silicium utilisée est en effet inférieure à 5 nm alors que celle des cellules de silicium cristallin avoisine les 150-200 nm.

Toutes confondues, ces filières représentent à peine plus de 5 % du marché photovoltaïque mondial actuel, mais certaines pourraient être amenées à se développer de façon importante dans les années à venir.

Les principales sont :

- Le silicium amorphe (a-Si)
 - Le silicium cristallin en couche mince
 - Le Tellure de Cadmium (CdTe)
 - Le Cuivre/Indium/Sélénium ou Cuivre/Indium/Gallium/Sélénium (CIS ou CIGS)
 - L'Arséniure de Gallium (Ga-As)
 - Le silicium micromorphe (a-Si :H / 8c-Si)
-
- **Le Silicium amorphe** est non cristallin (cf. figure 4). Ces modules présentent l'avantage de garder un bon niveau de production lorsque la luminosité est faible ou lorsque la température est élevée. Déposées sur un support flexible, les fines couches de a-Si permettent une meilleure intégration architecturale mais n'atteignent des rendements que de l'ordre de 7 à 10 %. On retrouve cette technologie sur les calculatrices solaires. Tous les modules solaires à base de silicium amorphe subissent une dégradation initiale prévisible, provoquée par la lumière, qui se stabilise après quelques centaines d'heures d'exposition à la lumière (généralement 3-10 semaines d'exposition en extérieur). Le principal défaut de cette technologie est sa durée de vie (puissance de production > 80 % de la puissance crête), qui ne dépasse pas actuellement 10 ans.

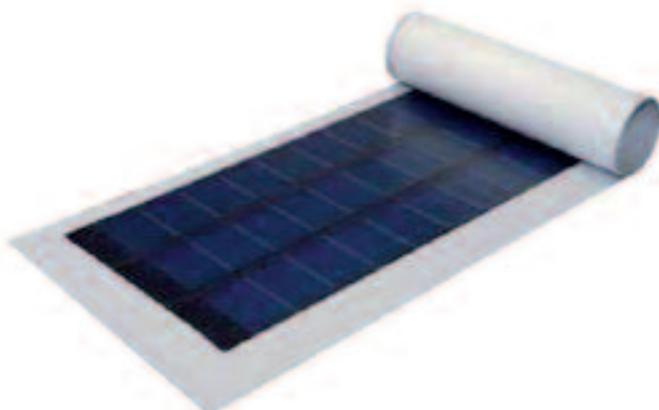
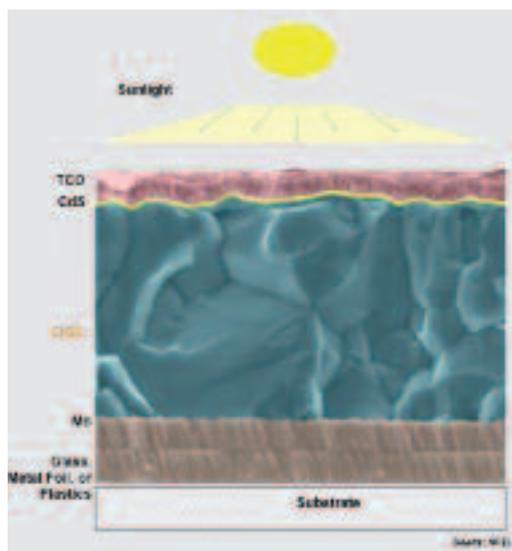


Figure 4 : Rouleau de silicium amorphe

- **L'Arséniure de Gallium (Ga-As)** offre un haut rendement mais son coût très élevé cantonne son usage à certaines applications spécifiques comme le domaine spatial.
- **Le Tellure de Cadmium (CdTe)** a fait le succès de First Solar, l'un des plus grands fabricants de panneaux solaires photovoltaïques à l'échelle mondiale. Ces panneaux ont de nombreux avantages (faible impact des ombres, bonne production par temps couvert), et s'adaptent particulièrement bien dans les régions du nord. Cependant la présence de Cadmium en fait un produit qu'il faut manipuler (création du module, utilisation, recyclage) en respectant des consignes de sécurité spécifiques.
- **La technologie CIS - CIGS** (Sélénium et Cuivre associés à une couche allant de l'indium pur au Gallium pur en passant par différents dosages liant les deux) permet la conversion des photons du rayonnement solaire sur un plus large spectre (cf. figure 6). Comme toutes les technologies en couche mince, le CIS et CIGS sont moins sensibles à la température que les modules cristallins, et sont plus efficaces en cas de rayonnement diffus, de faible ensoleillement ou d'ombrages. Cette technologie a séduit plusieurs industriels qui produisent déjà leurs modules CIS ou CIGS en grande quantité avec des rendements moyens de 10 %.

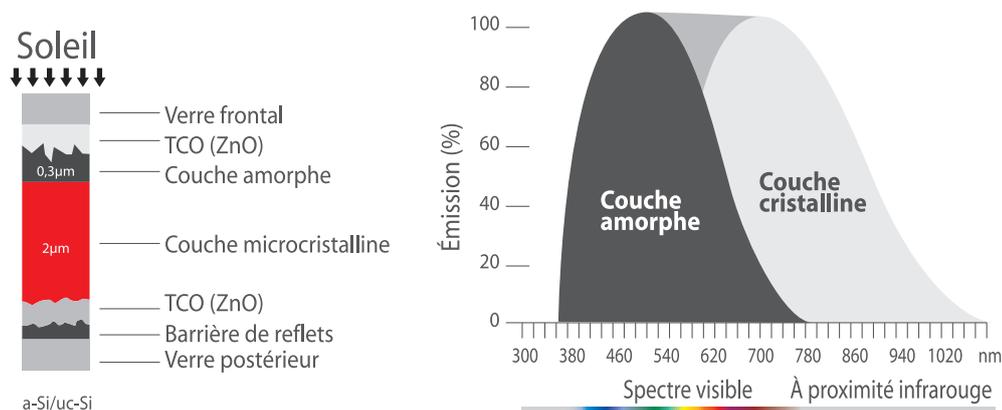


L'utilisation d'un processus de fabrication permettant de hautes performances et une application en couches minces rend cette technologie idéale pour la fabrication de panneaux solaires souples, tout en permettant la création de panneaux rigides.

Figure 6 : Coupe d'une cellule CIGS

- **Les modules micromorphes** (cf. figure 7) utilisent une technologie à « double jonction ». Le processus allie une couche supérieure de silicium amorphe à une couche inférieure microcristalline. La couche de surface absorbe et convertit la zone visible du spectre solaire, tandis que la couche inférieure traite celle de la zone de l'infrarouge à proximité. Pour cette raison, ils sont encore plus efficaces.

Figure 7 : décomposition d'une cellule micromorphe et spectre solaire traité



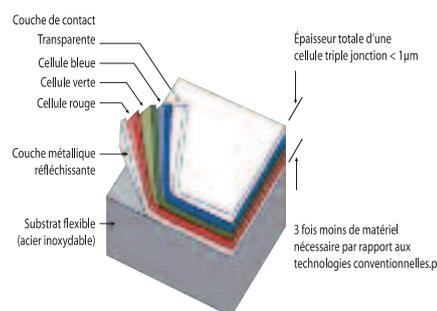
Les modules photovoltaïques micromorphes sont réputés pour leur capacité de production d'énergie par faible irradiation. En moyenne, leur production est supérieure de 12 % à celle des modules cristallins standard car ils captent un spectre lumineux plus important.

C. Les technologies de 3^e génération

La recherche vise aujourd'hui à améliorer les rendements et à baisser les coûts de production des modules.

Trois pistes sont principalement à l'étude :

- **Les cellules multijonctions** semblent annoncer des rendements supérieurs à 30 % mais avec un coût important. On trouve déjà sur le marché des produits tels que les bi-jonctions micromorphes (paragraphe précédant), mais les essais en laboratoire portent sur la conception de cellules à triples jonctions. Le rendement d'une telle cellule, si elle venait à être stabilisée, en serait démultiplié.
- **Les cellules à concentration** sont placées au sein d'un foyer optique qui concentre la lumière, sur le principe du solaire thermique à concentration. Leur rendement est élevé, de l'ordre de 20 à 30 %, mais elles doivent absolument être placées sur un support mobile (tracker) afin d'être constamment positionnées face au soleil et leurs performances par temps couvert sont fortement amoindries.
- **Les cellules organiques**, composées de semi-conducteurs organiques déposés sur un substrat de plastique ou de verre, bien qu'encore au stade expérimental, offrent un rendement moyennement élevé (de l'ordre de 5 à 10 %) mais présentent des perspectives intéressantes de réduction de coûts.



D. Tableau récapitulatif :

	Technologie	m ² / kWc	Rendement en %	Coût de production	Avantages	Inconvénients
1 ^{ère} génération	Silicium Monocristallin	8	1722	+++	Rendement, durée de vie (jusqu'à 30 ans), technologie maîtrisée	Prix, coût de production (matériaux et énergie grise) nécessaire, sensible à la température et au manque de luminosité
	Silicium polycristallin	10	1215	+++	Rendement, durée de vie (jusqu'à 30 ans), rapport qualité/prix	Coût de production (matériaux et énergie grise), sensible à la température et au manque de luminosité
	Silicium ruban	10	1215	+++	Consommation de silicium divisée par 2	
2 ^{nde} génération	Silicium amorphe	16	58	+	Fonctionne avec un éclairage faible, supporte la température, prix, facilité d'installation	Faible rendement en plein soleil, performances qui diminuent avec le temps, faible durée de vie. Stabilisation sous lumière (perte η au début de l'exploitation)
	CdTe	1216	710	++	Faible coût de production (<1€/Wc), rendement correct, Fonctionne avec un éclairage faible, supporte la température, durée de vie (>25ans)	Composants dangereux pour l'homme et l'environnement (nécessite de suivre un protocole de sécurité pour la manipulation et le recyclage)
	CIS – CGIS		812	++	Meilleur rendement des couches minces, faible coût de production (<2€/Wc), durée de vie (>25ans), Fonctionne avec un éclairage faible, supporte la température	Le rendement reste inférieur au cristallin
	Micromorphe (double jonction) GaAs		811 >23	++ ++++++ Rendement	Faible épaisseur, pose facile, Fonctionne avec un éclairage faible, supporte mieux la température, Faible coût de production (12€/Wc)	Rendement assez faible, courte durée de vie, Usage réservé à l'aérospatial
3 ^{ème} génération	Multijonction		613	++	Faible épaisseur, pose facile, Fonctionne avec un éclairage faible, supporte mieux la température, Faible coût de production (12€/Wc)	peu de recul sur la technologie, process industriels non maîtrisés
	Concentration		>40		Haut rendement pour un minimum de cellules	Tracker obligatoire, centrales au sol, nécessite un fort ensoleillement direct
	Cellules organiques	Encore en développement	Record à 8,5% en laboratoire		Très faible épaisseur (possibilités nanométriques => film PV), pas de silicium	Les cellules sont encore instables (risque de destruction et instabilité dans la durée)

PRIME D'INTÉGRATION AU BÂTI

La France a choisi de s'identifier sur la scène photovoltaïque en mettant en place la notion d'intégration au bâti. Les arrêtés du 10 juillet 2006 et du 4 mars 2011 instaurent, ainsi une prime à l'intégration au bâti qui vise à faciliter le développement de composants standard de la construction intégrant la fonction de production d'électricité photovoltaïque.

A. Les conditions générales

Les équipements de production d'électricité éligibles à la prime d'intégration au bâti doivent répondre aux deux conditions suivantes :

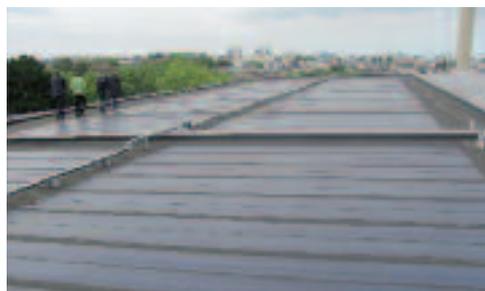
- Assurer une **fonction technique ou architecturale essentielle** à l'acte de construction, soit participer à :
 - la tenue mécanique
 - la protection ou la régulation thermique
 - la protection physique des biens ou des personnes
 - la recherche d'un esthétisme architectural particulier.
- Venir en **substitution d'un ou plusieurs équipements** de la structure bâtie.

B. Les équipements éligibles et non éligibles

1. Systèmes éligibles

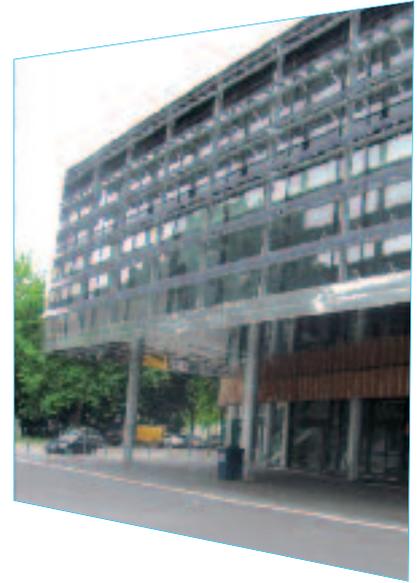
En toiture : les systèmes photovoltaïques suivants sont éligibles à la prime d'intégration :

- Un assemblage comprenant le support et le module photovoltaïque
- Un assemblage comprenant les rails de fixation et les modules photovoltaïques
- Un assemblage considéré comme une toiture sur tout ou partie du bâtiment afin de l'ombrer. On entend par toiture l'ensemble des éléments qui composent la couverture et le couvrement d'une construction (matériaux de couverture proprement dit et leurs supports)
- Un assemblage comprenant le support associé à une membrane souple d'étanchéité comprenant des cellules photovoltaïques, conçu industriellement et spécifiquement pour cette application. (toitures amorphes)



Les systèmes dont les modules ne sont pas solidaires entre eux et où l'étanchéité est assurée par l'installation d'une sous-couche de type bac acier ou PEHD (polyéthylène haute densité) sont éligible à une prime d'intégration dite simplifiée.

- **En brise-soleil** : on entend par brise-soleil, les dispositifs rapportés extérieurement sur une façade, en avant des baies vitrées, de façon à les protéger de la lumière directe du soleil et de ces apports thermiques au bâtiment. En cas d'absence de baie vitrée, le système ne peut être considéré comme intégré.



- **En bardage** : on entend par bardage, les équipements fixés mécaniquement par l'intermédiaire d'une ossature secondaire solidaire soit d'une paroi support (bardage rapporté) soit de l'ossature de la construction pour le revêtement extérieur d'une ou plusieurs façades d'une construction, toujours dans un souci de recherche esthétique ou architecturale particulière.



- **En verrière** : grâce à leur aspect semi-transparent, des équipements photovoltaïques peuvent faire office de **verrière**. Sont donc concernés par cette catégorie les équipements se substituant à une ou plusieurs parois vitrées mais sans structure de renforcement : l'équipement photovoltaïque assure lui-même la stabilité et sécurité mécanique de l'installation.

- **En garde-corps** : les garde-corps sont des ouvrages à hauteur d'appui qui ont pour rôle de protéger contre les risques de chute fortuite dans le vide les personnes stationnant ou circulant à proximité de ce dernier, mais non de leur interdire le passage ou l'escalade forcée ou volontaire.



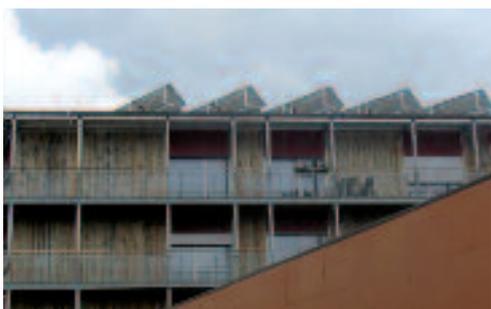
2. Systèmes non éligibles

Les installations photovoltaïques suivantes ne sont pas éligibles à la prime d'intégration au bâti :

- Les toitures solaires, sur ardoises ou tuiles, installées en surimposition



- Les surimpositions sur toiture-terrasse que ce soit sur bacs lestés ou sur châssis



- Les brises soleil sans baie vitrée

Annexe 2

TARIF D'ACHAT PV – Décret de MARS 2011

Ces tarifs d'achat s'appliquent à tous les porteurs de projets photovoltaïques sauf :

- les projets dont la puissance est ≤ 3 kWc et qui ont fait une demande de raccordement avant le 04/03/2011,
- les projets dont la PTF avait été acceptée avant le 02/12/2011.

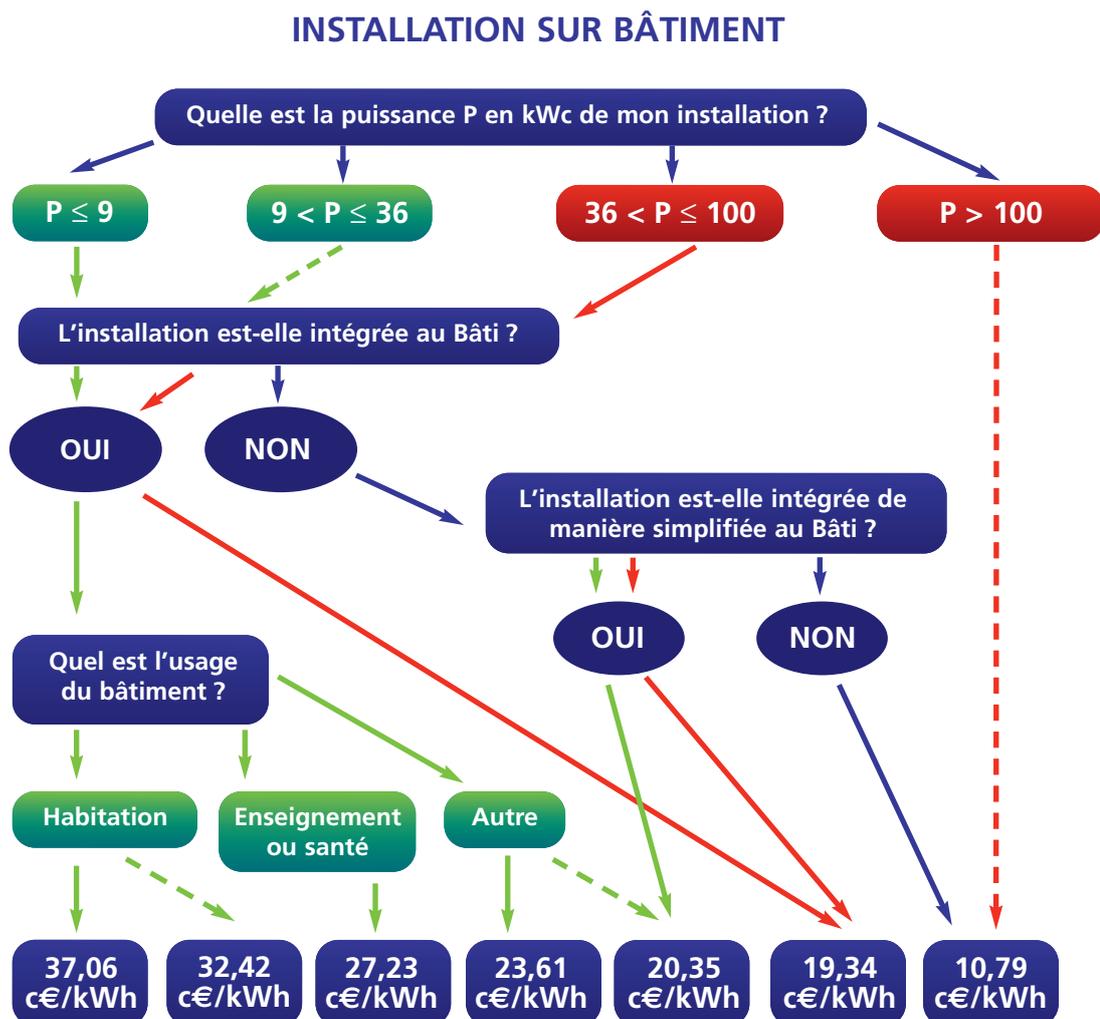
Ces projets bénéficieront alors des tarifs du décret du 30/08/2010 à condition que leur installation soit effectivement raccordée dans les 18 mois après l'acceptation de la PTF ou 9 mois après le 10/12/2010.

Solvabilité financière des porteurs de projets :

En plus des éléments techniques de son installation, le porteur de projet devra justifier de sa solvabilité financière pour mettre en œuvre son projet. Ainsi, pour tout projet > 9 kWc lors de sa demande de raccordement il devra fournir soit :

- 1 attestation bancaire garantissant sa solvabilité à hauteur de 60 c€/Wc,
- 1 offre de prêt bancaire. Celle-ci peut être conditionnée à l'obtention du tarif d'achat demandé ou à l'obtention d'une PTF inférieur à 500 €/kWc.

Organigramme du tarif d'achat photovoltaïque :



Sur ce schéma les flèches bleues ont priorités sur les flèches pleines vertes et rouges qui elles-mêmes ont priorités sur les pointillés.

Les installations au sol bénéficieront d'un tarif à 10,79 €/kWh.

Tous ces tarifs seront de plus plafonnés. La production énergétique maximale qui sera alors prise en compte est égale à $P * 1\,500$ h. Au-delà d'une telle production les tarifs d'achat pour le surplus sera de 5 c€/kWh.

Évolution trimestrielle des tarifs :

À chaque trimestre et dès le 30/06, ces tarifs peuvent évoluer (rester identiques ou diminuer) selon la puissance totale en demande. La procédure est décrite en figure 1.

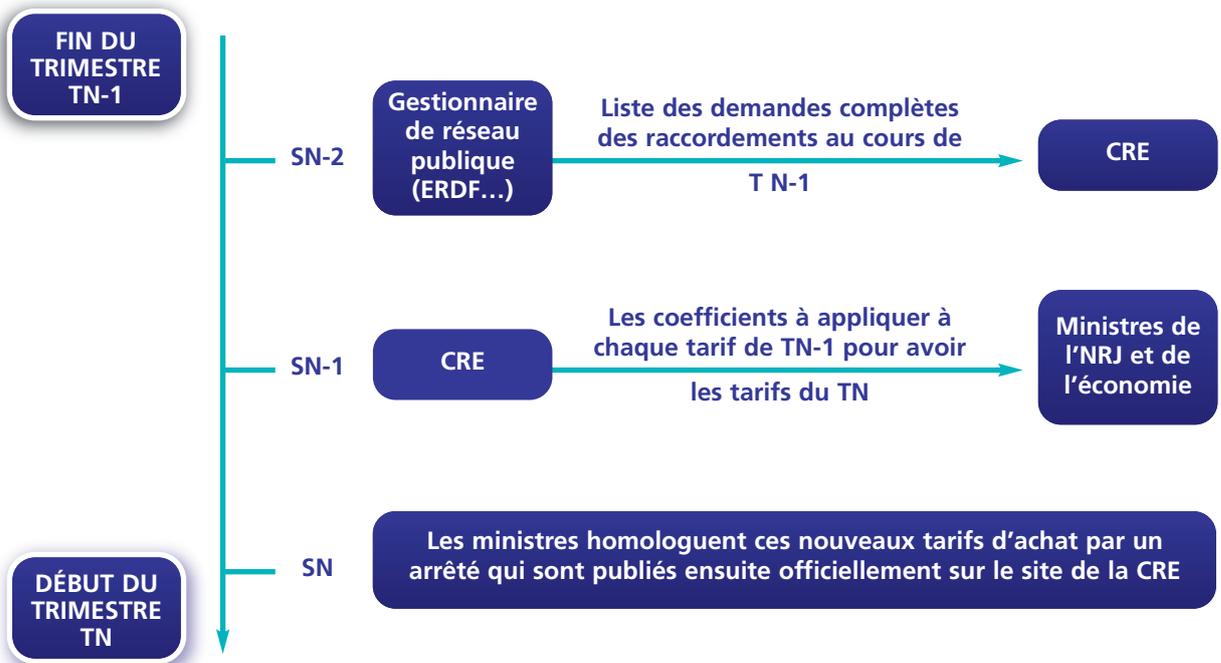


Figure 1 : Procédure d'évaluation des tarifs d'achat d'un trimestre à l'autre

Selon la puissance maximale cumulée des demandes de raccordement complète, les tarifs d'achats du trimestre achevé (TN-1) sont multipliés par un coefficient pour donner les tarifs d'achat du trimestre suivant (TN).

Les valeurs de ces coefficients sont illustrées dans la figure 2.

Cette évaluation des puissances cumulées est faite séparément pour les installations intégrées au bâti sur les habitations (surtout les particuliers) et toutes les autres installations. La valeur du coefficient pour les installations PV intégrées au bâti sur une habitation peut donc être différentes de celle des autres installations.

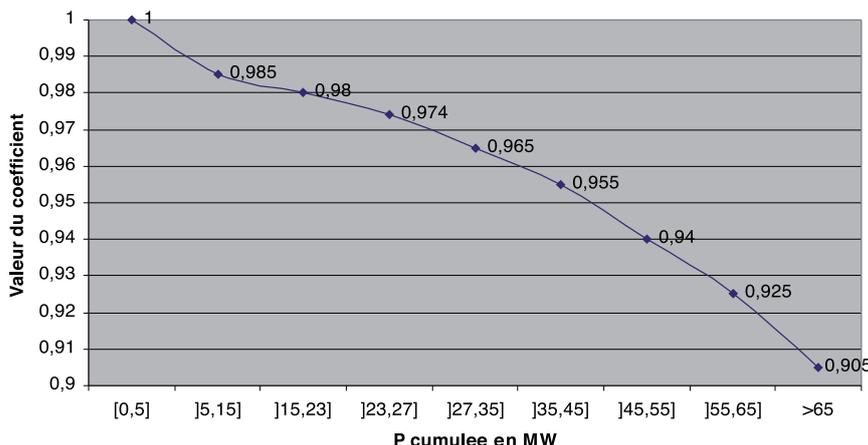


Figure 2 : Valeur des coefficients multiplicatifs trimestriels en fonction de la puissance cumulée

Annexe 3

Tableau d'analyse financière, analyse des projets

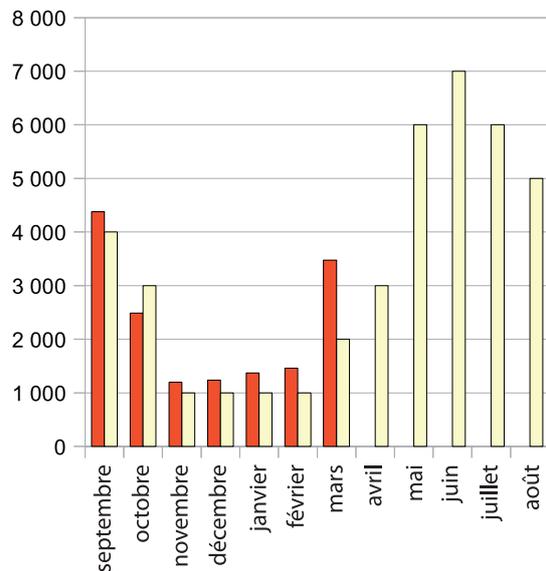
Nom du Projet		Projet 1	Projet 2	Projet 3	Projet 4	
		2008 : polycristallin en toiture	2009 : CIGS en toiture	2010 : Brise Soleil polycristallin	2011 : Polycristallin en toiture	
Hypothèses de calcul	Puissance installée (Wc)	16 650,00	5 290,00	6 400,00	16 650,00	
	Investissement de base (en €HT)	95 243,00	30 106,00	36 546,00	53 260,00	
	Aide des partenaires (€)	19 048,00	6 021,20	7 309,20		
	Investissement aides déduites (en €HT)	76 195,00	24 084,80	29 236,80	53 260,00	
	€/Wc	5,72	5,70	5,71	3,20	
	Productible annuel annoncé (kWh/an)	16 113,00	4 950,00	7 000,00	18 315,00	
	Tarif d'achat brut (à la signature du contrat)	0,60	0,60	0,42	0,30	
	Inflation (les 2 coefficients sont pris égaux)	2%				
	Coefficient L	1,012	1,012	1,012	1,004	
	Taux d'actualisation	5%	0,05	0,05	0,05	
Maintenance et Provision onduleurs (€/an)	1%	761,95	240,85	292,37	532,80	
TURPE (€/an)	forfait	51,00	51,00	51,00	51,00	
Impôt sur les sociétés	33%					
0 Investissement		-76 195,00	-24 084,80	-29 236,80	-53 260,00	
1 Flux (à actualiser) an 1		7 189,97	2 191,76	2 222,15	4 212,24	
2 Flux an 2		7 267,70	2 215,64	2 245,79	4 227,13	
3 Flux an 3		7 346,36	2 239,81	2 269,71	4 242,09	
4 Flux an 4		7 425,96	2 264,26	2 293,92	4 257,11	
5 Flux an 5		7 506,52	2 289,01	2 318,42	4 272,18	
6 Flux an 6		7 588,05	2 314,06	2 343,21	4 287,32	
7 Flux an 7		7 670,56	2 339,40	2 368,30	4 302,52	
8 Flux an 8		7 754,06	2 365,05	2 393,69	4 317,78	
9 Flux an 9		7 838,56	2 391,01	2 419,39	4 333,10	
10 Flux an 10		7 924,07	2 417,28	2 445,39	4 348,48	
11 Flux an 11		8 010,60	2 443,87	2 471,71	4 363,92	
12 Flux an 12		8 098,18	2 470,77	2 498,34	4 379,42	
13 Flux an 13		8 186,81	2 498,00	2 525,29	4 394,99	
14 Flux an 14		8 276,50	2 525,55	2 552,57	4 410,62	
15 Flux an 15		8 367,27	2 553,43	2 580,17	4 426,31	
16 Flux an 16		8 459,12	2 581,65	2 608,10	4 442,06	
17 Flux an 17		8 552,08	2 610,21	2 636,37	4 457,88	
18 Flux an 18		8 646,16	2 639,11	2 664,98	4 473,76	
19 Flux an 19		8 741,36	2 668,36	2 693,93	4 489,70	
20 Flux an 20		8 837,71	2 697,96	2 723,23	4 505,71	
VAN (sur 20ans, actualisation 5%)		20 561,73 €	5 466,45 €	899,29 €	679,56 €	
TRB aidé (en années)		7,88	8,11	9,94	9,59	
TRB sans aide (en années)		9,85	10,14	12,43	9,59	
TRI (en %)		8,02%	7,56%	5,36%	5,16%	
Charbon	Emissions CO2 annuelle (g)	105,00	1 691,87	519,75	735,00	1 523,08
	Equivalent charbon (g)	978,00	15 758,51	4 641,10	6 846,00	17 912,07
	CO ₂ évité par an (kg)		14,07	4,32	6,11	15,99
	CO ₂ évité sur 20 ans (kg)		281,33	86,43	122,22	319,78
	kg CO ₂ évité / kWc		16,90	16,37	19,10	19,21
Fioul	Equivalent Fioul (g)	891,00	14 356,68	4 410,45	6 237,00	16 318,67
	CO ₂ évité par an (kg)		12,66	3,89	5,50	14,40
	CO ₂ évité sur 20 ans (kg)		253,30	77,81	110,94	287,91
	kg CO ₂ évité / kWc		15,21	14,74	17,19	17,29
Gaz (OC)	Equivalent Gaz (g)	427,00	6 880,25	2 113,65	2 969,00	7 820,51
	CO ₂ évité par an (kg)		5,19	1,59	2,25	5,90
	CO ₂ évité sur 20 ans (kg)		103,77	31,88	45,08	117,55
	kg CO ₂ évité / kWc		6,23	6,04	7,04	7,08

Annexe 4

STADE DU MOUSTOIR - TRIBUNE SUD

Production photovoltaïque

Rapport d'étape après 7 mois pleins de fonctionnement



En rouge le réel, en jaune le prévisionnel.

Tableau des relevés

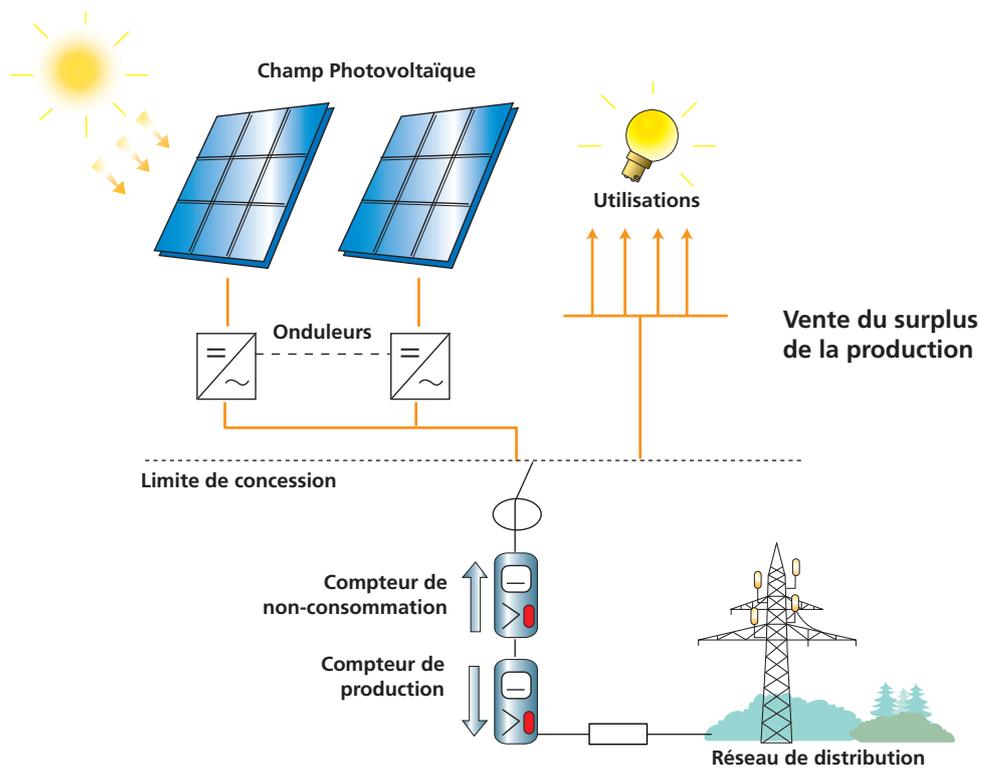
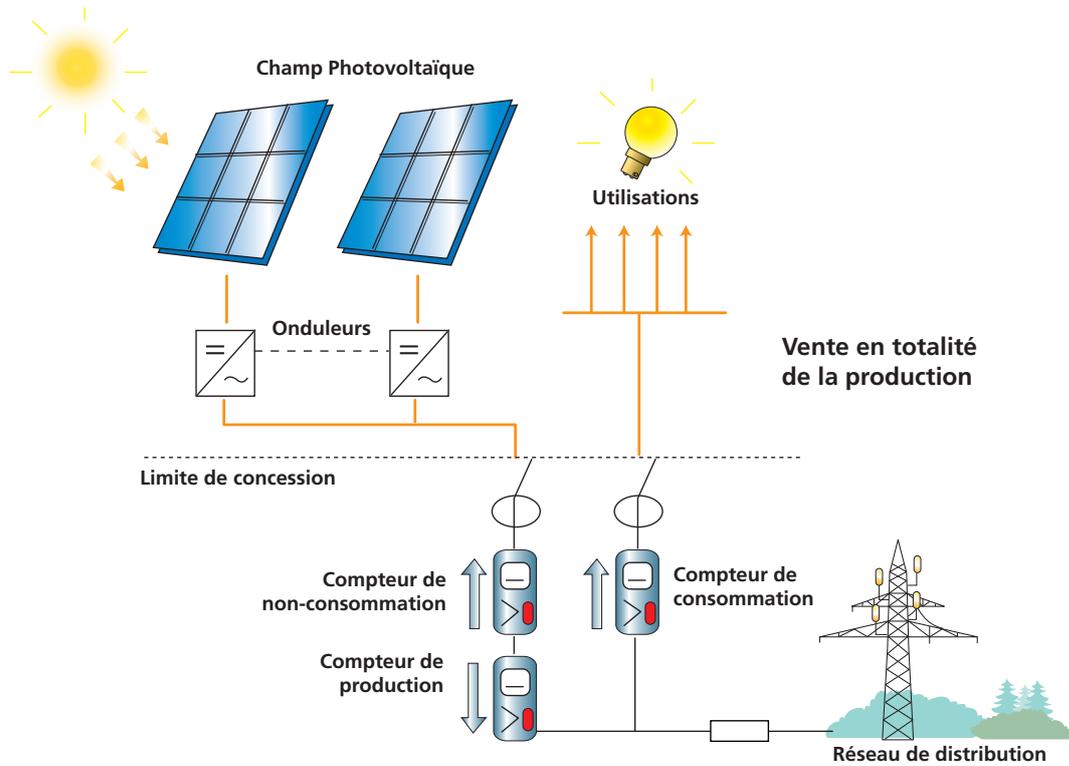
	Relevé en kWh		Prévision en kWh
		dont HC	
janvier	1 371	255	1 000
février	1 460	188	1 000
mars	3 476	454	2 000
avril			3 000
mai			6 000
juin			7 000
juillet			6 000
août			5 000
septembre	4 380	664	4 000
octobre	2 487	447	3 000
novembre	1 200	200	1 000
décembre	1 239	189	1 000

La production en heures creuses est encore abondante en février.

1 En rouge les relevés réels effectués par EDF

Annexe 5

SCHÉMAS DE RACCORDEMENT



Ce document est disponible sur les sites des partenaires
et sur le site du PLAN ECO-ENERGIE BRETAGNE

www.plan-eco-energie-bretagne.fr

Contacts

ADEME
Nadège NOISSETTE : nadège.noisette@ademe.fr
33, bd Solférino - CS 41217
35 012 Rennes Cedex
Tél. 02 99 85 87 00 - Fax : 02 99 31 44 08



CONSEIL RÉGIONAL DE BRETAGNE
Sandrine MÉTIER : sandrine.metier@region-bretagne.fr
283, av. du Général Patton - CS 21 101
35 711 Rennes cedex 7 - Tél. 02 99 27 10 10

Partenaires

