Potentiel technologique et économique des filières PV à haut rendement

Congrès JNES 2017









Alliance Nationale de coordination de la Recherche pour l'Énergie **CVT - Consortium de Valorisation Thématique**

Clim de Lalousarion Inemarique A

Une étude répartie en trois phases



Etat de l'art des avancées technologiques et position de la France

Evolution du coût de l'électricité délivrée selon les technologies

Filières

Filière silicium

Filière couches minces

Filière technologies émergentes

Technologies

Al-BSF PERC PERT Hétérojonction Back-contact

CIGS/CZTS CdTe

Silicium couches minces

Perovskites OPV

Cellules à nanofils

Systèmes

, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,			
Centrale au sol: 1-10 MW Centrale au sol: 50 MW		Allemagne	
	au sol :	Italie	
		France	
		Californie	

Quelles évolutions du coût de production de l'électricité photovoltaïque peut-on attendre ?

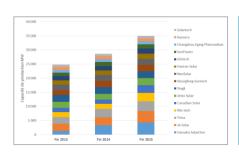
Potentiel de baisse de coût inhérente à chaque technologie ?

Quelle est l'importance des différentes composantes du LCOE ?

Quel impact de la localisation?

Ensoleillement et politiques locales ?

Recensement des investissements industriels



Quelles sont les technologies PV qui restent au centre des investissements et celles qui décrochent?

Comment est structurée l'industrie : consolidation ou fragmentation ?

Quelle est l'évidence pour les tendances technologiques spécifiques ?

La base documentaire constituée



→ Une très importante base de connaissance a été constituée lors de l'étude, avec environ 13 000 familles de brevets et autour de 39 000 publications scientifiques.

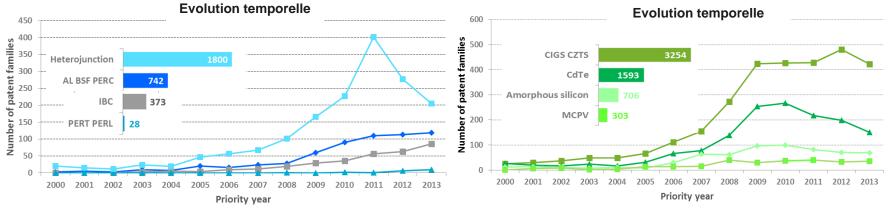
Filières	Technologies	Nombre de brevets	Nombre de publications
Silicium cristallin	AI-BSF / PERC	742	1127
	Back-contact	373	1019
	PERT / PERL	28	131
	Hétérojonction	1800	895
Couches minces	CdTe	1593	2845
	Silicium amorphe	701	2803
	CIGS, CZTS	3254	4381
	Multijonction à concentration	311	664
Emergentes	Cellules organiques	6450	22977
	Perovskites	442	1990
	Cellules à nanofils	709	1964

- → Analyse des corpus de brevets et de publications:
 - Couverture temporelle
 - Couverture géographique
 - Acteurs principaux (académiques et industriels)
 - réseaux de collaborations.

Dynamiques d'évolution des brevets

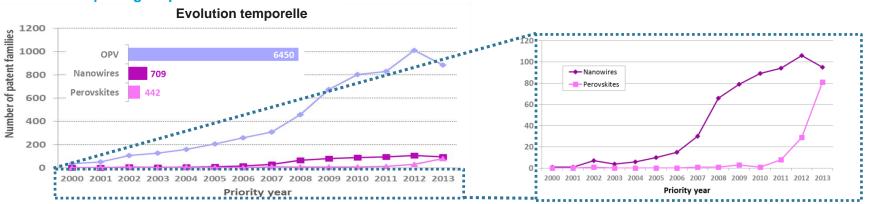


→ Le dépôt de brevets pour le PERT/PERL, a commencé depuis 2012, mais à un rythme bien inférieur aux autres technologies ; à voir si' il suit une trajectoire similaire à Al BSF/Back Contact → l'échec commercial de certaines technologies couches minces (a-Si et le CPV) et la consolidation industrielle au niveau CIGS et CdTe pourrait expliquer la stagnation et même la diminution du nombre de dépôt de brevets.



→ Toutes technologies confondues, le nombre de brevets déposé chaque année sur l'OPV est le plus conséquent (sauf pour les brevets de base de silicium)

→ Cela s'explique, en partie, par l'importance des brevets de matériaux organiques applicables dans les technologies OLED / électronique organique et OPV



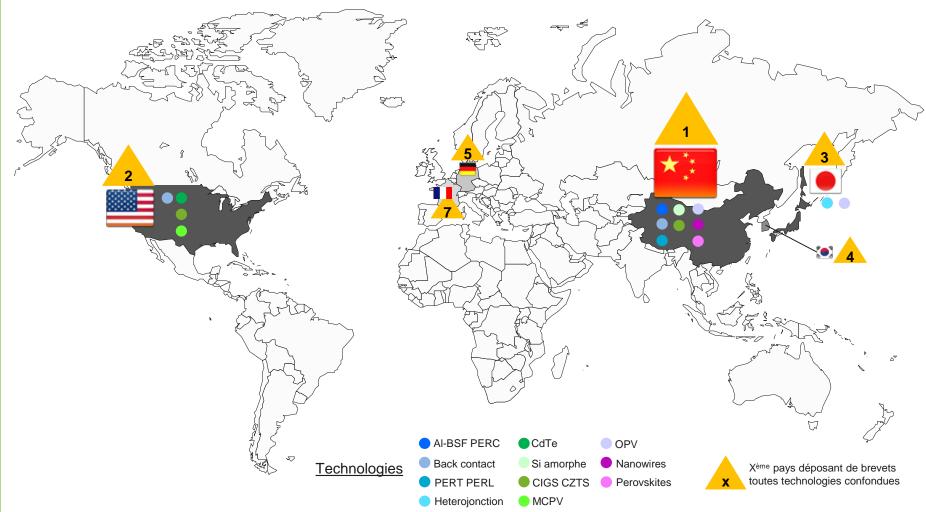
Analyse géographique Zones principales de dépôts de brevets



→Toutes technologies confondues, les trois principales zones de dépôts de brevets sont la Chine, les US et le Japon.

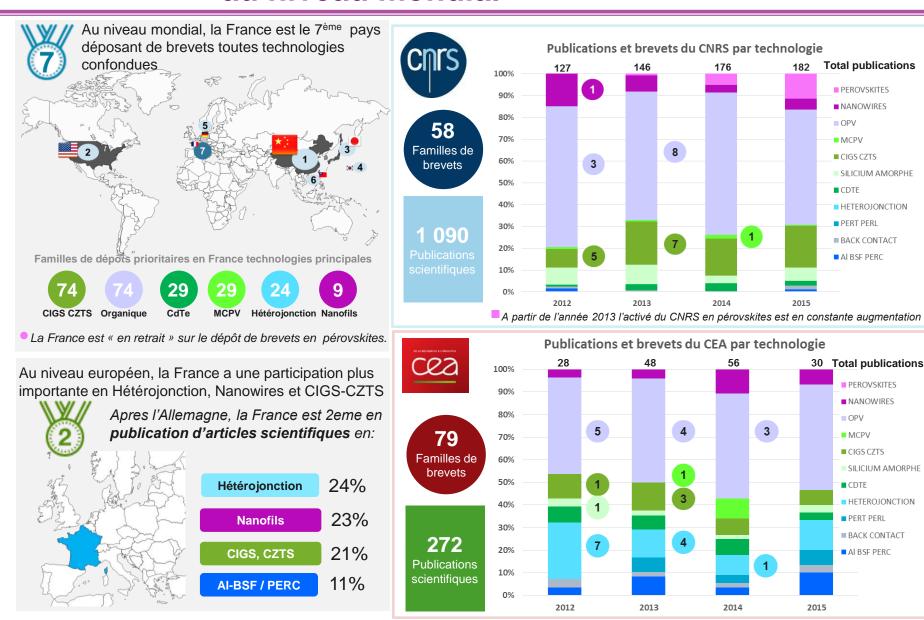
→Les acteurs chinois travaillent sur toutes les technologies, une spécificité couches minces à noter aux US ainsi que hétérojonction et OPV au Japon dues à la présence d'acteurs industriels majeurs sur ces technologies.

Répartition des brevets par principaux pays de priorité et spécificités technologiques



Positionnement de la France : deux centres au niveau mondial

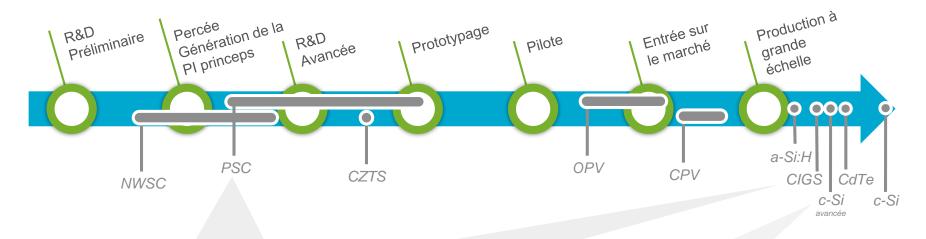




Maturité, rendements, marchés : détails sur trois exemples



Maturité des technologies



Records de rendement

Pérovskites

22,1%

18%

KRICT/UNIST $< 1 cm^2$

STABILISE, 250h **EPFL** Surface inconnue **CIGS**

22,6 %

17,9 %

Cellule ZSW $< 1 \text{ cm}^2$

vitesse

Flexibilité

Fonctionne à l'intérieur

Module **AVANCIS** 622 cm²

HTJ

26,3 %

20,0 %

Cellule Kaneka 180 cm²

Module NSP 16 269 cm²

Atouts et Marchés

Atouts

Propriétés ajustables Rendement élevé Tandem sur Silicium possible Semi-transparence

Marchés / Niches

BIPV Résidentiel. Commercial, Centrale? (en tandem) Indoor

Atouts

Marchés / Niches Production grande Centrale au sol Résidentiel et Commercial Hors réseau Semi-transparence **BIPV** Coeff température faible Transport

Atouts

Rendement élevé Résidentiel et Commercial Compatible avec module bifacial Coeff. température faible Potentiel de simplifier des étapes de production

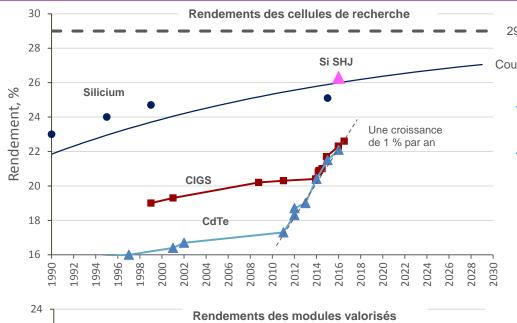
Marchés / Niches

Hors réseau

BIPV

De la recherche à l'échelle industrielle, le rendement panneau ne cesse de grimper

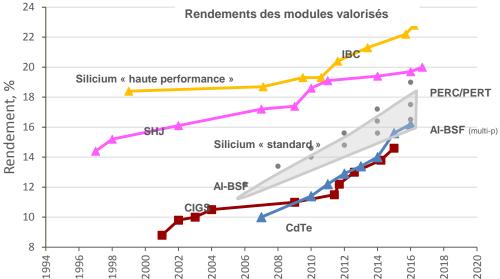




29% rendement maximal de Goetzberger pour le silicium

Courbe de rendement paramétré (silicium)

- La technologie hétérojonction (SHJ) franchi le cap de 26% en 2016
- un progrès très accéléré autour de 1%/an depuis 3-5 ans des technologies couches minces de CdTe et CIGS



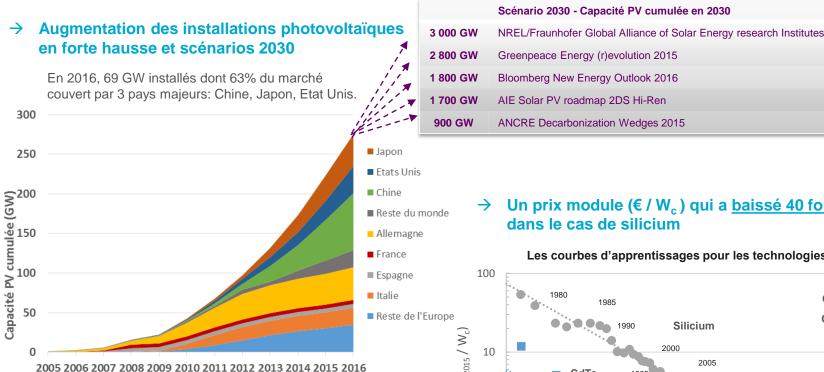
L'évolution de la performance des meilleurs modules montre les mêmes tendances que les cellules de recherches

- → La nouvelle technologie PERC a permis au silicium « standard » de maintenir un écart autour de 2% avec les meilleurs modules CdTe
- → Le silicium « haute performance » peut atteindre 22% au niveau module, mais aujourd'hui un focus purement sur le rendement n'est pas une stratégie suffisante sur le marché de masse; un faible coût de production est crucial

Source: CEA, FIST

La force disruptive du solaire vient d'une courbe d'apprentissage étonnante et constante





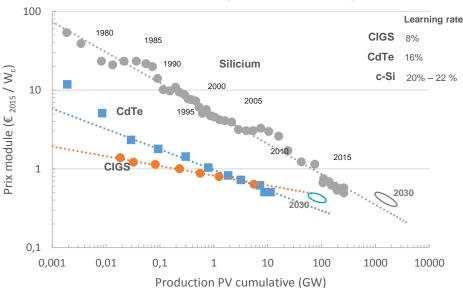
Ces courbes ne montrent pas encore un signe d'épuisement grâce à :

Source: JRC PV status report 2014 valeurs 2005-2014, Photon consulting 2015-2016

- Des progrès technologiques incrémentaux sur l'ensemble de la chaine de la valeur
- Des innovations de rupture : bifacialité des modules
- Une augmentation continue du rendement

Un prix module (€ / W_c) qui a baissé 40 fois en 30 ans

Les courbes d'apprentissages pour les technologies du PV



Source: Strategies Unlimited, Navigant, EUPD, pvXchange, IHS, Fraunhofer PSE, Trina Solar, First Solar, Kersten et al

Des prix records de l'énergie solaire le 30 €/MWh plusieurs fois battu en 2016

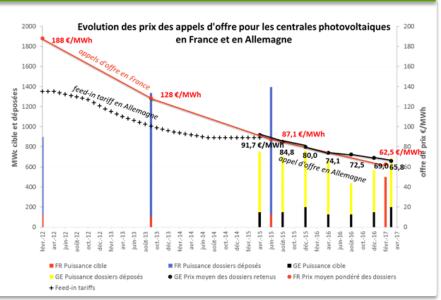


Les appel d'offres de long terme ou power purchase agreements PPAs

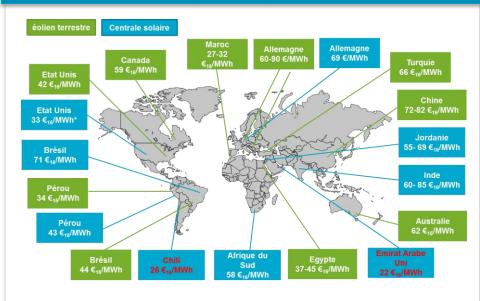
Le prix d'achat proposé par le lauréat est garanti sur une durée de 15 à 25 ans selon le contrat.

Ce type d'appel d'offre se généralise dans le monde. Les récentes offres témoignent d'une baisse importante des prix des centrales solaires PV au sol, notamment dans les régions qui bénéficient des meilleures conditions d'ensoleillement.

Exemple de la France et de l'Allemagne : vers un régime d'appels d'offres pour les centrales au sol



Appel d'offres de long terme récents sur les énergies renouvelables - projets réceptionnés en 2016-2019



Les appel d'offres en France et en Allemagne

1er appel d'offre en France en 2012 pour les centrales au sol de 700 kW à 17MWc. Baisse des prix constatées > 30% entre chaque appel d'offre. Prix moyen du dernier appel d'offre clôturé en février 2017: 62.5 €/MWh

En Allemagne, depuis 2014, un appel d'offre tous les 4 mois pour les centrales au sol <10 MW et baisse moyenne de 5% à chaque appel.

Mise en perspective : centrale au sol de 10 MW 🚣 🗚 🗀 Le coût de l'énergie solaire en 2016 et disparités locales CYT-Consortium



4 localisations:

GHI (kWh/m²/an)

San Diego: 1870



GE Dresde: 1 060

FR Toulouse: 1 450

ITA Naples: 1 600

→ Les composantes du LCOE



Irradiation Locale

DNI **GHI**

T°C ambiante



 $\frac{CAPEX + \sum_{n=1}^{N} \frac{OPEX}{(1 + WACC)^{n}}}{\sum_{n=1}^{N} \frac{Production \ ann\'{e}\ n}}$ LCOE = ---

Architecture PV Orientation Fixe / tracker 1-2 axes

> Rendement module Salissure, effet d'ombre/neige, **ALBEDO** GCR, dégradation

> > Pertes électriques câblage DC, AC, réseau rendement onduleur

FINANCIER

Durée d'exploitation Durée de construction Taux d'actualisation type de financement inflation Incitation Crédit d'impôt obligations, tarifs de rachat

CAPEX

- Modules (€/Wc)

- BOS

Support Tracker

Câblage DC, AC

Onduleur Transformateur

- Frais fixes Conception

Préparation du siteFrais généraux

Interconnexion Permis de construire

OPEX

- Charges variables Coût d'installation Commerciale marketing Main d'œuvre Nettoyage, monitoring Protection site

- Frais fixes Assurance Frais généraux Location site Permis de construire

- Remplacement Onduleur (durée de vie) Module (durée de vie)



La localisation mais pas que performance du module & installation



→ La quantité d'électricité produite par un panneau PV dépend de :

Une énergie inégalement distribuée sur le globe

l'irradiation locale

Elle peut varier d'un facteur 2,2 entre le Nord de l'Angleterre (GHI 1000 kWh/m²) et les Emirats (2200 kWh/m²) ou l'Afrique Centrale (2400 kWh/m²) et d'un facteur 1,5 à l'intérieur de la France (1100 à Lille à 1650 kWh/m² Marseille)

1450 1600 1100 1850

| Wh/m²/an | Dresde | San Diego | Etats Unis | San Unis

Gain de 5-7% pour les CM dans les régions aux fortes chaleurs

Les performances du module

- ✓ Le rendement surfacique
- ✓ Sensibilités aux fortes températures (TCE) l'angle de réflectance, et faible irradiance (LLE)
- ✓ La dégradation des performances

Gain avec tracker de +20 à 35%

L'installation

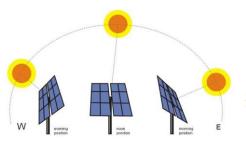
Orientation du module azimut, angle, effet d'ombre, en fixe ou tracker 1,2 axes.

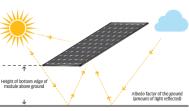
Localisation et installation

Gain de +5 à 25%

Concept innovant

Le module bifacial







CAPEX: Modules et BOS



faibles écarts entre localités dans un marché globalise ecarts entre localités dans un marché globalise ecordination de la Recherche pour l'action Thématique

- → Le module : critères de choix : Prix et Performance
 - → Le prix marché des modules standards en 2016 autour de 400 €/kW
 - → Perspectives 2030 selon l'ITRPV : réduction de 30%

Balance financière :

Performance (kWh/kWc) dans les conditions réelles Garantie dégradation

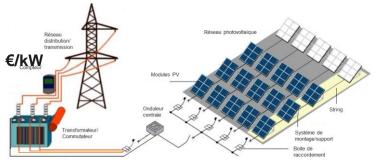
CAPEX (€/kWc installé)

(tracker, bifacial, effets de la température et_____ faible irradiance)



- → Le BOS (balance of system) inclut tous les éléments (et coûts), autres que les modules, pour mettre en œuvre un système PV – valeur de référence en 2016: 400 €/kWc
- → L'étude a montré des disparités locales concernant en particulier le coût de la main d'œuvre, les frais de projets (recherche du terrain, démarches administratives et réglementaires) ainsi que les frais de raccordement.
- → Cas particulier de la France, avec la prise en compte des frais de renforcement du réseau pouvant augmenter le CAPEX de plus de 10%.

Coût BOS pour une centrale au sol (inclinaison fixe) par pays : €/kW



Source: Boldwatts, Sunrator, CEA



OPEX:

Le terrain : enjeu majeur dans certaines localités



- → L'O&M d'une centrale solaire concerne tous les frais annuels de gestion :
 - → La maintenance préventive et curative



→ **Loyer**: peut être quasi nul dans certains pays ou représenter un enjeu majeur dans d'autres.



Cas de la France et de l'Allemagne : mesures d'aménagement du territoire visant à protéger les zones agricoles et forestières.

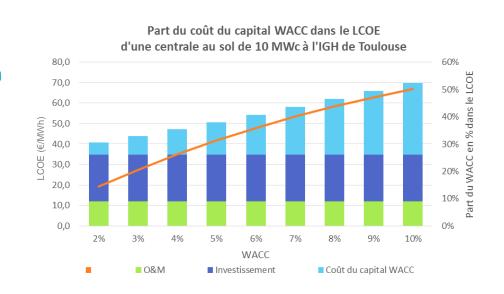
- → Taxes foncière & d'exploitation l'exception française !!
- → L'étude appliquée aux 3 localisations, donne une valeur moyenne de l'OPEX de 15 €/kWc/an avec des variations jusqu'à 30% en fonction de la contrainte sur le terrain.
- → Dans le cas de la France, les taxes appliquées aux entreprises de réseau augmentent d'un facteur 2 l'OPEX.



Le coût du capital WACC un contexte financier favorable



- → WACC coût du capital immobilisé: représente le taux de rentabilité annuel moyen attendu par les actionnaires et les créanciers, en retour d'un investissement. Il dépend de la répartition fond propres / dette et du risque à l'investissement perçu par les investisseurs ainsi que la compétition entre les banques.
- → En 2016, les appels d'offres sur les centrales solaires photovoltaïques avec rachat garanti à un prix donné pendant 15-25 ans, sont perçus par les banques et les investisseurs privés comme un investissement sure, de long terme.
- → Valeurs constatées en 2016 pour les pays avec une politique EnR:
 - Dette/fond propre : 80/20% et même 90/10%
 - Taux bancaire: 1-1,5% + SWAP 20 ans: 0,7-1,25 (2016)
 - TRI fond propre : 6-7%
 - \rightarrow WACC de 3 4 % sur 20 25 ans.
- → Cas de l'Italie, avec politique de soutien EnR gelée :
 - → WACC 8% (cf. Etude DIACORE pour les projets éolien en 2014)



Le coût d'énergie LCOE en 2016 suivant la localisation



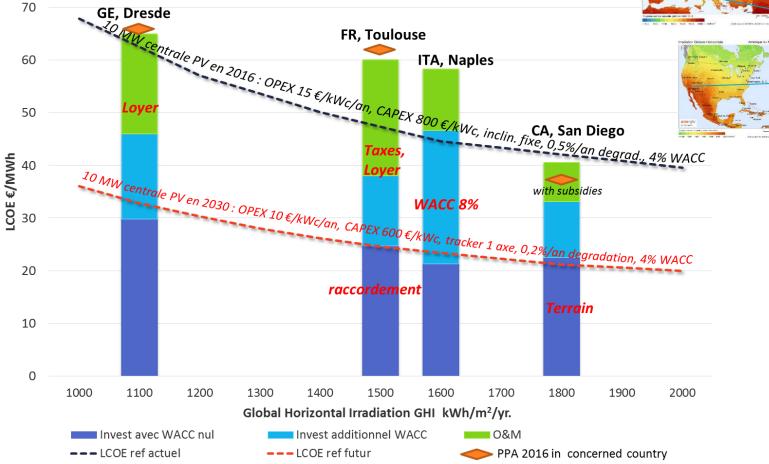
→ LCOE en fonction de l'irradiation et variation en fonction des particularités locales.

Bonne concordance du modèle avec les dernières offres PPA



ITA Naples: 1 600

San Diego: 1870



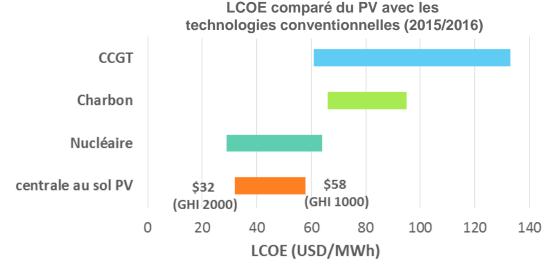
En 2030, dans les zones favorables en Europe un prix en dessous de 30 €/MWh sera possible.

Source: CEA

Mondialement, un déploiement massif du solaire dans les années à venir parait inéluctable



- → En 2016, le solaire photovoltaïque est la source d'électricité la moins chère dans certains pays du monde, sans aucune subvention.
- → Selon nos estimations, le coût moyen de l'électricité PV devrait tendre vers des valeurs entre 20 et 40 €/MWh en 2030 (GHI entre 2100 et 900 kWh/m²/an) et dans les zones favorables en Europe un prix en dessous de 30 €/MWh sera possible.



Source: conventionnels IEA-NEA OCDE (2015) - solaire CEA,

- → Si le déploiement massif du solaire parait inéluctable, les enjeux de l'intégration de cette énergie variable se posent ainsi que la prise en compte de nouveaux usages rendus possible par les modules innovants (substrats flexibles, couches minces, OPV) pour lesquels la recherche française est déjà positionnée.
- → . Une étude sur les systèmes et leur intégration permettrait d'étudier les opportunités offertes au secteur industriel soutenu par la recherche (via le stockage, technologies numériques pour la gestion de l'énergie).

Pour aller plus loin ...



Merci pour votre attention

Ce travail collaboratif (CEA-TECH & FIST SA (CNRS)) fournit une vue d'ensemble, objective, du secteur

photovoltaïque.



L'étude complète est disponible sur demande en contactant CVT ANCRE

et sur le site internet CVT ANCRE étude:

http://www.allianceenergie.fr/Les-Etudes-CVT.aspx

