



Lignes directrices sur le photovoltaïque intégré au bâtiment dans la région méditerranéenne



FOSTERinMED

Fostering Solar Technology in the Mediterranean Area



Projet
financé par
l'UNION EUROPÉENNE



**IEVP
CTMED**

LA COOPÉRATION TRANSFRONTALIÈRE
EN MÉDITERRANÉE

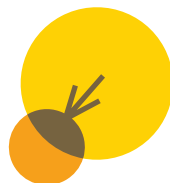


Projet
financé par
l'UNION EUROPÉENNE



**IEVP
CTMED**
LA COOPÉRATION TRANSFRONTALIÈRE
EN MÉDITERRANÉE

Cette publication a été produite avec l'aide financière de l'Union européenne
dans le cadre du Programme IEVP CT Bassin Maritime Méditerranée



FOSTERinMED

Chef de projet

Université de Cagliari
Département d'Ingénierie Civile et Environnementale et d'Architecture
Prof. Antonello Sanna

Éditeurs

Maddalena Achenza (*Université de Cagliari - Italie*)
Giuseppe Desogus (*Université de Cagliari - Italie*)

Cet ouvrage collectif rassemble des contributions de tous les membres du comité technique et scientifique.

Chapitre 1

Introduction

Maddalena Achenza et Giuseppe Desogus
(*Université de Cagliari - Italie*)

Chapitre 2

Types de Modules PV

Maddalena Achenza (*Université de Cagliari - Italie*)
en collaboration avec
Mattia Beltramini
(*L'Agence Spéciale de Services aux Entreprises - CSPI - Italie*)

Chapitre 3

Intégration photovoltaïque

Maddalena Achenza (*Université de Cagliari - Italie*)
en collaboration avec
Antonella Trombadore (*Gouvernement régional de Sardaigne - Italie*)

Chapitre 4

Améliorer la perspective sociale, institutionnelle et des concepteurs de bâtiments

Maddalena Achenza (*Université de Cagliari - Italie*)

Chapitre 5

Performance et dimensionnement du BIPV / Annexe

Giuseppe Desogus (*Université de Cagliari - Italie*)
en collaboration avec
David Pifarré (*Association des Chambres de Commerce et d'Industrie de la Méditerranée, ASCAME - Espagne*)
Kamelia Youssef et Mohamed Salah Elsobki
(*Confédération égyptienne des Associations d'affaires Européennes - Égypte*)
Elias Kinab et Talal Salem (*Institut de Recherche Industrielle - Liban*)
Firas Alawneh et Laith Basha (*Société Royale Scientifique - Jordanie*)
Neji Amaimia (*Chambre de Commerce et d'Industrie de Tunis - Tunisie*)
Maria Francesca Muru (*Gouvernement régional de Sardaigne - Italie*)

Chapter 6

Les bonnes pratiques

Maddalena Achenza et Giuseppe Desogus
(*Université de Cagliari - Italie*)

Conception graphique

Giancarlo Murgia

Clause de non-responsabilité

Cette publication a été produite avec l'aide financière de l'Union européenne dans le cadre du Programme IEVP CT Bassin Maritime Méditerranée. Le contenu de ce document sont la seule responsabilité du UNICA and FOSTer in MED partners et ne peut en aucun cas être considéré comme reflétant la position de l'Union européenne ou celles des structures de gestion du Programme.

Le budget total du projet est de 4,5 millions d'euros qui est financé pour un montant de 4,05 millions d'euros par l'Union européenne à travers l'Instrument Européen de Voisinage et de Partenariat

Déclaration sur le Programme

Le Programme IEVP CT Bassin Méditerranéen 2007-2013 est une initiative de coopération transfrontalière multilatérale financée par l'Instrument Européen de Voisinage et de Partenariat (IEVP). L'objectif du Programme est de promouvoir un processus de coopération durable et harmonieuse au niveau du bassin méditerranéen en traitant les défis communs et en valorisant ses potentialités endogènes. Il finance des projets de coopération en tant que contribution au développement économique, social, environnemental et culturel de la région méditerranéenne. Les 14 pays suivants participent au Programme: Chypre, Egypte, France, Grèce, Israël, Italie, Jordanie, Liban, Malte, Palestine, Portugal, Espagne, Syrie (participation actuellement suspendue), Tunisie. L'Autorité de Gestion Commune (AGC) est la Région Autonome de Sardaigne (Italie). Les langues officielles du Programme sont l'arabe, l'anglais et le français (www.enpicbmed.eu).

Déclaration générale sur l'Union européenne

L'Union européenne est constituée de 28 États membres qui ont décidé de mettre graduellement en commun leur savoir-faire, leurs ressources et leur destin. Ensemble, durant une période d'élargissement de plus de 50 ans, ils ont construit une zone de stabilité, de démocratie et de développement durable tout en maintenant leur diversité culturelle, la tolérance et les libertés individuelles. L'Union européenne est déterminée à partager ses réalisations et ses valeurs avec les pays et les peuples au-delà de ses frontières.



01

Introduction

8



02

Types de Modules PV

12



03

Intégration photovoltaïque

28



04

**Améliorer la perspective sociale,
institutionnelle et des concepteurs de bâtiments**

42



05

**Performance et dimensionnement
du BIPV**

50



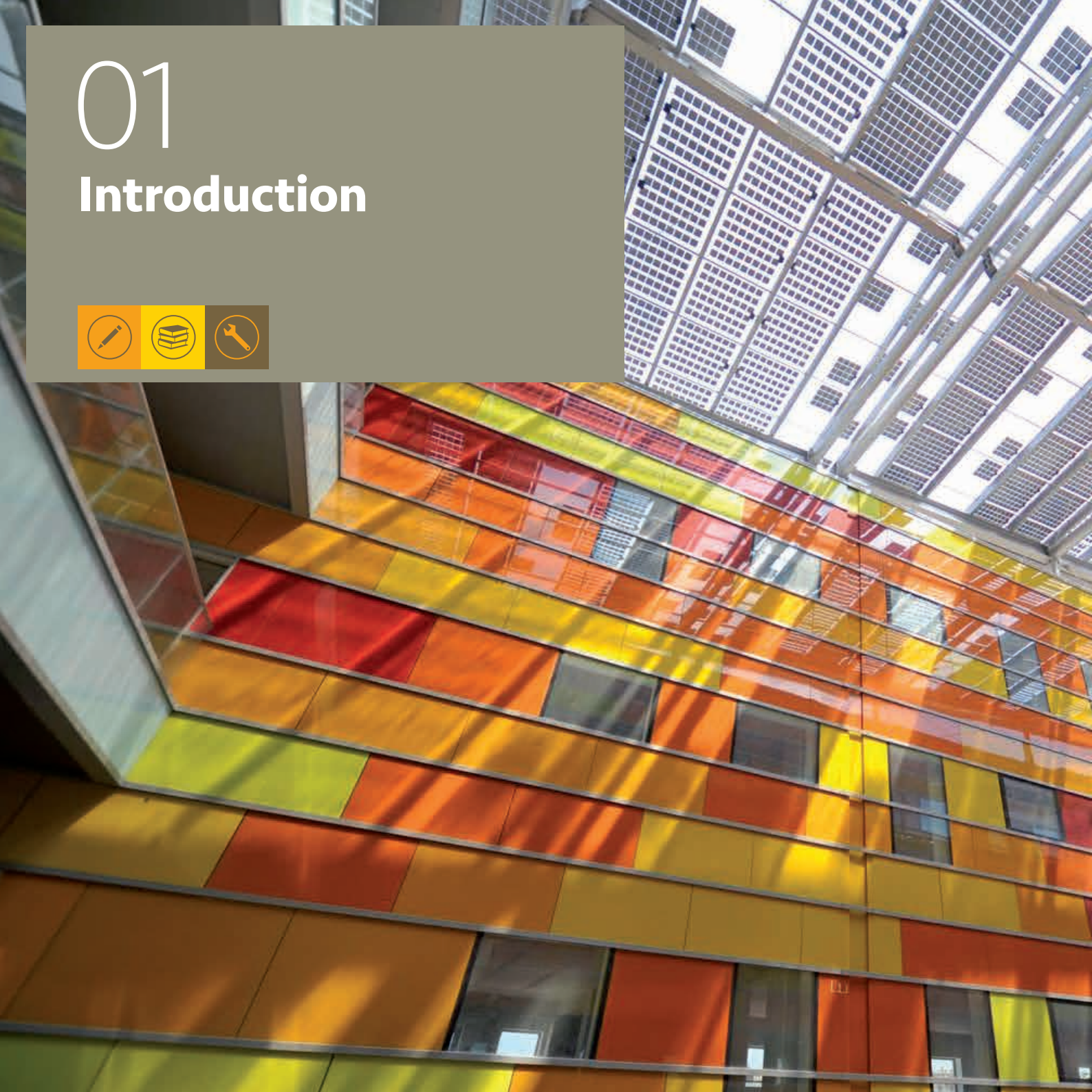
06

Les bonnes pratiques

74

01

Introduction





Qu'est-ce que le photovoltaïque intégré aux bâtiments (BIPV)?

Le photovoltaïque est une technologie répandue qui permet la génération d'un courant continu (DC) à travers le rayonnement solaire. Les systèmes photovoltaïques sont composés de cellules PV faites de matières semi-conductrices, liées pour former un module ou un panneau solaire qui peut être utilisé séparément ou installé sur des bâtiments.

Il existe deux façons d'installer les systèmes PV sur les bâtiments nouveaux et existants: on peut les intégrer ou simplement les poser. Dans ce cas, on parlera de systèmes photovoltaïques appliqués aux bâtiments ou BAPV, alors que le BIPV désigne des modules photovoltaïques envisagés par un concepteur pour remplacer et non pas couvrir un élément du bâtiment. Il peut s'agir du toit, d'une façade, d'un élément de protection solaire, ou d'un parapet. Grâce à une variété disponible sur le marché, le concepteur peut non seulement choisir la puissance et le type de la cellule PV mais également ses dimensions, sa couleur et sa transparence.

Pourquoi avoir recours à l'énergie solaire sur les bâtiments ?

Le concept clé qui se cache derrière la définition du BIPV veut que le photovoltaïque puisse avoir une fonction architecturale au-delà de la simple production d'énergie. L'imperméabilisation et la protection solaire n'en sont qu'un exemple. Ceci est la meilleure façon pour en tirer profit d'un point de vue économique et environnemental. Si les systèmes PV sont installés sur les bâtiments, il n'y aura pas besoin d'occuper plus d'espace et l'électricité est générée au point d'usage. Ceci diminuera les pertes dans la distribution et la transmission d'énergie au sein des réseaux électriques publics.

Si les systèmes PV sont correctement pris en compte dans la phase de conception, il y aura davantage d'opportunités à admirer pour les concepteurs.

Le photovoltaïque peut parfaitement être perçu comme un matériau de construction qui offre plusieurs possibilités techniques et esthétiques tout en contribuant à la création d'environnements confortables et conscients des questions énergétiques.

Nature des lignes directrices

Ces lignes directrices jouent un rôle clé dans le projet FOSTer in MED. Elles visent à disséminer et diffuser les connaissances dans les pays partenaires et au-delà. Elles représentent un outil utile pour aborder le BIPV et recevoir les informations de base pour planifier, concevoir et installer des systèmes PV.

Implémentation et dissémination

L'objectif des lignes directrices est d'assurer un matériel éducationnel pour les cycles de formations FOSTer in MED. Ils s'adressent aux étudiants, concepteurs d'architecture fabricants et les installateurs, qui vont profiter de cet outil de référence pour mieux comprendre la technologie et comment l'intégrer aux bâtiments.

Ces lignes directrices deviendront un repère pour permettre aux concepteurs de déterminer la viabilité du BIPV, et aux autorités locales de planification de recommander les meilleures pratiques. Ces lignes directrices seront disséminées au sein de l'industrie du PV, auprès des groupes de construction, des professionnels du concept, des financiers de la construction, et des autorités de planification tout en étant disponibles à d'autres institutions ; en d'autres termes, elle s'adresse aux parties prenantes de la chaîne de valeur du PV.

Les principales parties prenantes sont les:

- Étudiants universitaires
- Concepteurs d'architecture et d'usines (Architectes, ingénieurs, etc.
- Installateurs

Elles peuvent également intéresser les:

- Autorités publiques nationales
- Autorités locales de planification
- Services électriques
- Fournisseurs de réseaux
- Institutions financières
- Propriétaires de bâtiments
- Constructeurs des bâtiments



**CONCEPTEURS
D'ARCHITECTURE ET D'USINES**



ÉTUDIANTS UNIVERSITAIRES



INSTALLATEURS

La structure des lignes directrices

Les lignes directrices sont structurées de façon à permettre aux parties prenantes d'identifier les informations qui leur sont pertinentes. Une série d'icônes permettra aux lecteurs de trouver facilement la partie qui les intéresse. La première partie vise à définir les technologies PV actuelles et qui peuvent s'appliquer aux bâtiments. La deuxième partie soulignera la valeur ajoutée du BIPV en termes de design innovateur, d'efficacité énergétique, et de coût.

La troisième partie traite de la performance des systèmes intégrés, leur dimensionnement et leurs conditions. La quatrième partie montre quelques-unes des meilleures pratiques de la Méditerranée.

Les annexes, présentées dans un DVD à la fin de cette publication, offrent un aperçu de la production d'électricité et de sa distribution dans les régions partenaires en mettant en évidence les aspects critiques et la solution que représente le BIPV.

02

Types de modules PV





Il y a différents types de modules photovoltaïques, mais les plus utilisés pour l'intégration sont les cellules cristallines (mono et poly) et les cellules à couche fine. À ces dernières, on peut rajouter des nouveaux prototypes PV hybrides, à concentration et luminescents.

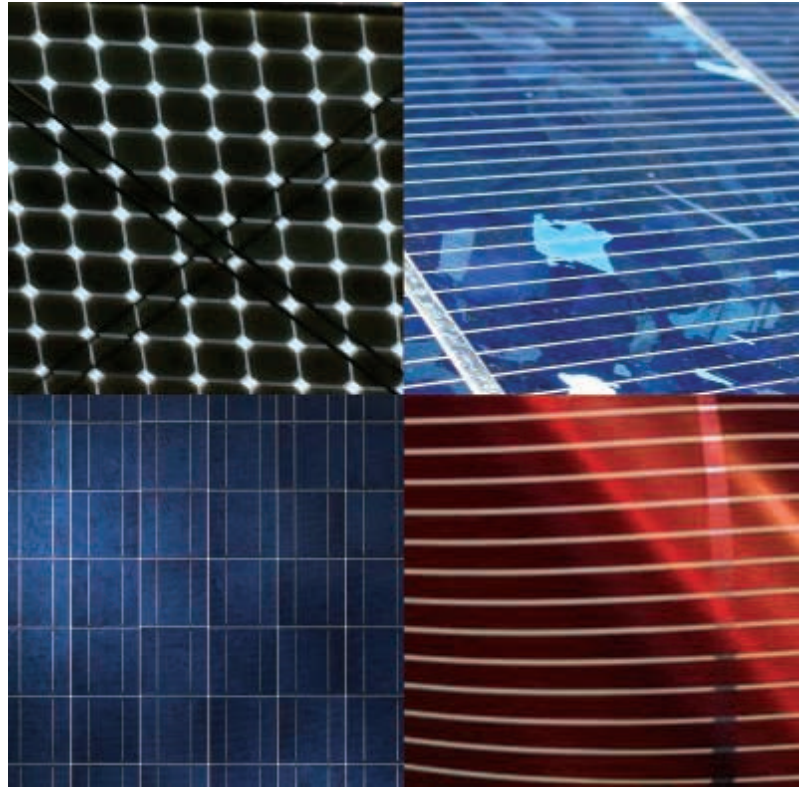


Fig 1 Différents types de panneaux PV

Les modules cristallins consistent en des cellules de silicium et sont très efficaces. Ils sont pourtant plus coûteux que les cellules à couche fine. Faits à partir d'un gros cristal de silicium, les panneaux monocristallins contiennent traditionnellement des polygones bleu-noirs. Parce qu'ils sont le type de module PV le plus efficace dans un bon éclairage, dans des conditions moyennes, avec une efficacité qui varie entre 15 et 20%, ils sont souvent utilisés dans des espaces d'installation limités of-

frant aux utilisateurs un maximum d'énergie pour l'espace utilisé. Leur énergie intrinsèque, celle dont on a besoin pour les produire, est plus importante que celle des autres types de PV.

Connus pour leur allure de verre brisé à cause du processus de fabrication qui implique l'usage de plusieurs cristaux de silicium, **les panneaux solaires polycristallins** sont les plus communs des panneaux solaires. Ils sont moins efficaces que les panneaux monocristallins avec une structure atomique désordonnée, une efficacité énergétique de 14 à 17% et une espérance de vie de 20 à 25 ans. Les modules à couche fine contiennent une couche amorphe photosensible très fine de silicium ou d'autres matériaux comme le diséléniure de cuivre et le tellure de cadmium (CdTe) déposées sur des surfaces bon marché comme le verre, le plastique et l'inox. Les panneaux solaires amorphes sont communs pour les applications BIPV à cause des possibilités qu'ils offrent et de leur côté esthétique. Les films minces peuvent être rigides ou flexibles et peuvent être produits en plusieurs couleurs, leur donnant une grande permanence d'application. Ils requièrent peu de matières premières et s'adaptent bien à la production automatisée, et sont ainsi assez bon marché.



Fig 2 Film PV mince sur un toit

Pourtant, leur efficacité est moins importante (4-8%) tout comme leur espérance de vie (15-20 ans). Les modules qui ne sont pas à base de silicium, comme le CdTe et le CIS, sont plus efficaces avec plus de 10% de rendement. Ils souffrent pourtant d'une baisse d'efficacité durant leur première année.

Les cellules à couches minces adhésives rassemblent la céramique aux couches minces. Une cellule meso-super-structurée (MSSC) peut être directement imprimée sur le verre et est fabriquée à - 150° C pour produire une couche semi-transparente robuste. Les nouveaux panneaux ont un gros potentiel pour les architectes, les ingénieurs de façade et les constructeurs. Ils peuvent être produits à partir de matériaux peu coûteux, abondants, non toxiques, non corrosifs et qui peuvent être réduits au volume désiré. Ils peuvent être imprimés directement sur le verre dans plusieurs couleurs, et sont ainsi parfaits pour le vitrage et les façades.

Une couche amorphe fine de silicium PV peut être utilisée pour recouvrir les cellules monocristallines. L'avantage de ce type de cellules c'est qu'elles sont plus sensibles au rayonnement solaire et opèrent mieux à des températures élevées que les cellules cristallines de silicium traditionnelles.



Fig 3a, 3b Panneau et élément thermique PV hybride

Pourtant ces cellules ont un prix élevé et sont connues comme cellules multicouches. Les modules PV hybrides combinent les cellules photovoltaïques à un collecteur thermique solaire qui capte l'énergie restante et élimine le gaspillage des cellules PV. De tels systèmes peuvent être conçus pour emporter la chaleur loin des cellules PV les refroidissant et améliorant ainsi leurs efficacité.

Le photovoltaïque concentré (CPV) remplace les plaques de cellules solaires avec un panneau optique qui concentre les rayons du soleil sur un petit groupe de cellules solaires à haute performance. La concentration de lumière permet plus d'efficacité des cellules PV et de remplacer une grande partie des matériaux photoactifs par des éléments moins coûteux qui concentrent la lumière. La fiabilité des systèmes CPV n'a pas encore été testée pour longtemps en tant que systèmes standards surtout que cette technologie n'a atteint une envergure industrielle que récemment.

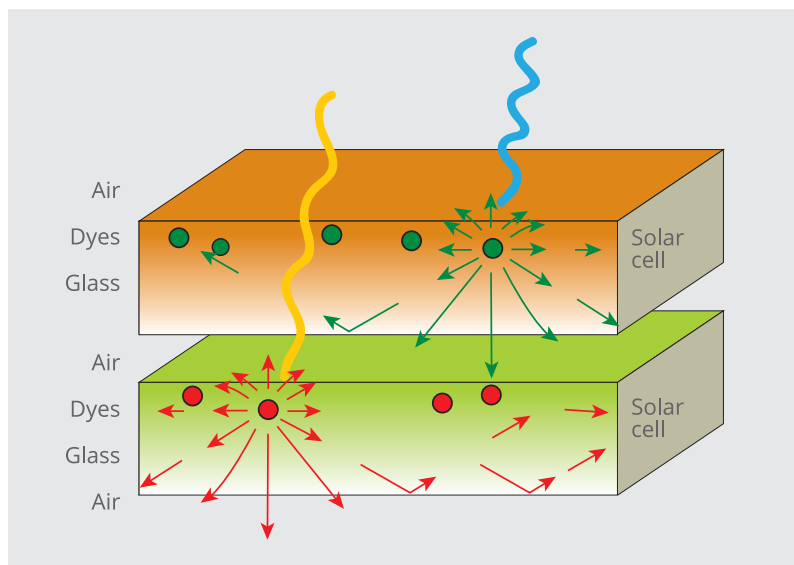


Fig 4 Schéma d'un concentrateur solaire luminescent

Ils peuvent être très efficaces si l'on emploie des concentrateurs d'axe à deux rails.

Le concentrateur solaire luminescent (LSC) est un appareil assez sim-

ple qui emploie un guide d'onde polymère/en verre et des molécules luminescentes pour produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil, une fois rattaché à une cellule photovoltaïque. Le dispositif disperse sur une plaque de plexiglas des teintes fluorescentes qui absorbent une partie de la lumière du soleil et qui ensuite en émettent sur la même plaque. La radiation se produit envers de petites cellules solaires dispersées sur les extrémités et qui la transforment en électricité. Malgré son potentiel de génération d'énergie solaire bon marché (ils sont plus efficaces que les modèles conventionnels, et produisent de l'énergie avec très peu de soleil. Ils peuvent être posés à la verticale et ainsi peuvent être bien intégrés), le développement du LSC fait face à plusieurs défis, dont la plus grande partie est liée aux matériaux luminescents utilisés dans sa conception. La recherche est toujours en cours et le produit n'est pas encore disponible sur le marché.

2.1 Couleur

La couleur des cellules photovoltaïques est le résultat d'un processus de fabrication, et ainsi le résultat d'un traitement au silicium. Certainement, la couleur des cellules photovoltaïques affecte l'absorption du rayonnement solaire, ce qui veut dire que l'énergie produite varie selon la couleur utilisée. Les dispositifs PV de différentes couleurs peuvent être intégrés comme lucarne PV colorée, rideau, sur le balcon ou toute autre construction multifonctionnelle, remédiant ainsi à la question de l'usage du PV dans les cas où l'intégration est obligatoire, comme il en est le cas dans les centres-villes historiques d'Europe.

2.2 Matériaux

Les cellules photovoltaïques sont faites à partir de matériaux semi-conducteurs. La majorité des matériaux sont cristallins ou à couche fine, et se distinguent en matière d'efficacité d'absorption de lumière, de conversion d'énergie, de technologie et de coût de production.

2.2.1 Silicium monocristallin

Les cellules à silicium monocristallin sont les plus communs dans l'industrie du PV. La technique de production principale est la méthode Czochralski (CZ). Une masse polycristalline pure se fond dans du creuset de

quartz. La graine de silicium monocristallin est ensuite plongée dans cette masse puis retirée lentement pour former un lingot. Les lingots sont tranchés en de fines lamelles de 200 à 400 micromètres (1 micromètre = 1/1,000,000 mètre). Les lamelles sont polies, enduites, interconnectés, puis assemblés en modules et rayons. Le silicium monocristallin à une structure moléculaire uniforme. À comparer avec les matériaux non cristallins, son uniformité engendre une forte efficacité dans la conversion d'énergie (le rapport de l'électricité produite par les cellules et la quantité de lumière solaire disponible, c.à.d. énergie sortante/énergie entrante). Plus l'efficacité de conversion des cellules PV est élevée, plus elle génère d'électricité dans une zone d'exposition au soleil donnée. Non seulement sont-ils efficaces énergétiquement, les modules monocristallins sont fiables pour des applications en extérieur.

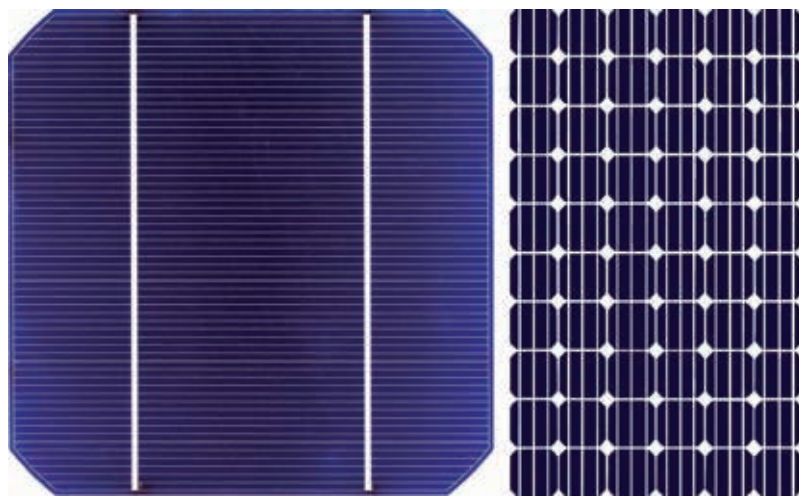


Fig 5 Cellules monocristallines de silicium

2.2.2 Silicium polycristallin

Se présentant sous la forme de petits grains de silicium monocristallin, les cellules PV polycristallines sont produites en coupant de fines lamelles dans un bloc de silicium polycristallin. Une approche plus avancée serait la méthode de croissance continue de rubans cristallins fins ou

encore même des feuilles avec la même épaisseur utilisée pour la fabrication des cellules PV. Puisqu'on n'a pas besoin de scier, le coût de production est moins important. La méthode de production la plus commerciale serait bien la croissance de monocristaux massifs en forme (EFG : Edge Defined Film Fed Growth). À comparer au silicium monocristallin, le silicium polycristallin est beaucoup plus robuste et peut être tranché à 1/3 l'épaisseur des matériaux monocristallins. Il a également un coût inférieur et des conditions de croissance moins contraignantes.

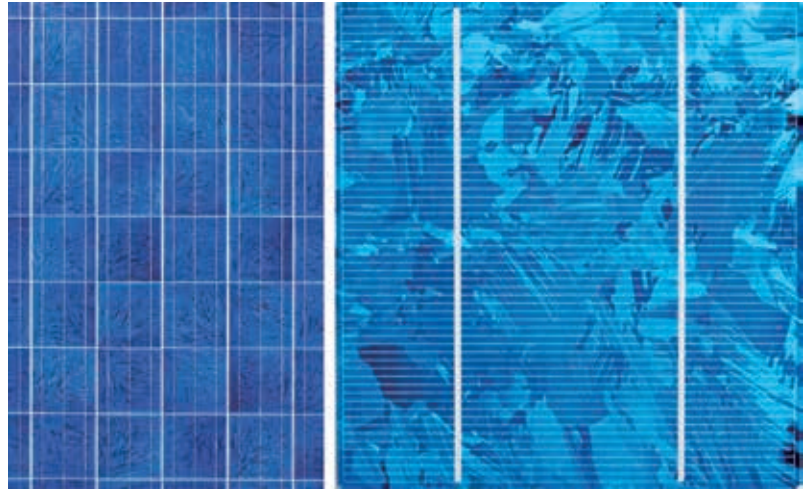


Fig 6 Cellules polycristallines de silicium

2.2.3 L'arséniure de gallium (GaAs)

L'arséniure de gallium est la technique solaire la plus performante sur le marché. Composé semi-conducteur combinant deux éléments : le gallium (Ga) et l'arsenic (As), le GaAs dispose d'un cristal similaire au silicium. L'avantage du GaAs est son niveau élevé d'absorption qui assure des records d'efficacité de plus de 27% pour chaque cellule et de 23% pour le panneau.

Ces avantages permettent aux cellules de GaAs d'être compétitives par rapport aux cellules de silicium même si leurs prix est bien plus élevé. Les recherches se concentrent pour trouver un moyen de réduire les coûts de production pour introduire les panneaux de GaAs sur le marché.

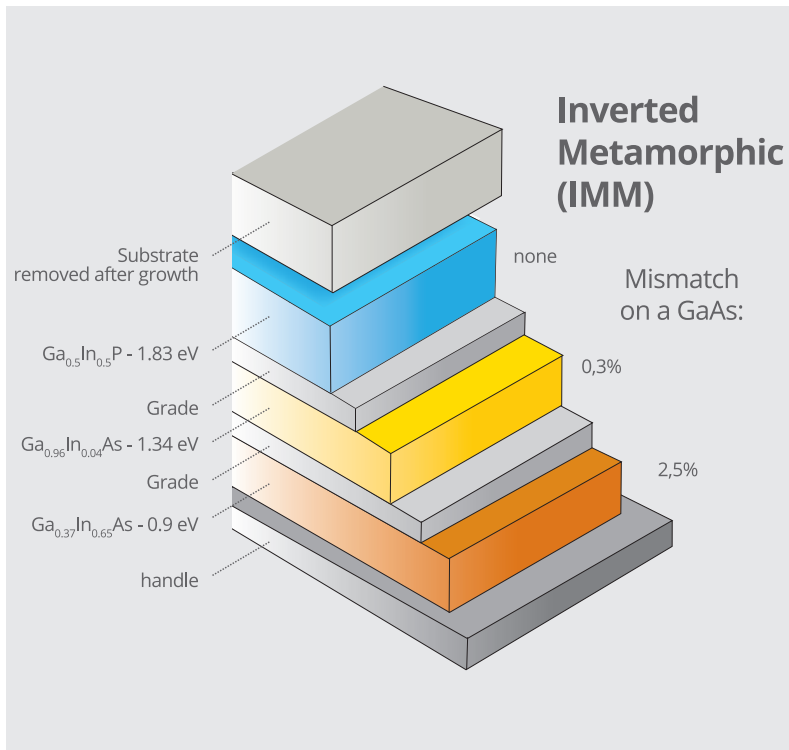


Fig 7a Schéma de l'arséniure de gallium

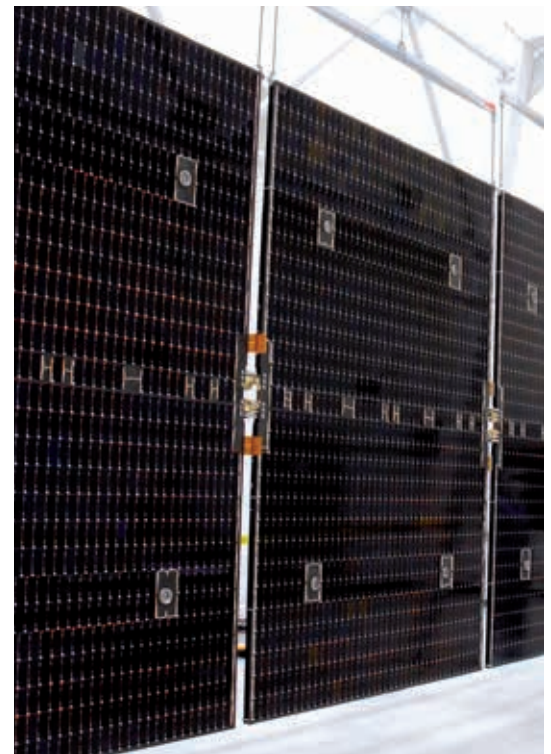


Fig 7b Panneaux solaires d'arséniure de gallium

2.2.4 Silicium amorphe (a-Si)

Souvent utilisé dans les appareils électroménagers qui ont une puissance et un coût de production assez faible, le silicium amorphe a dominé les éléments PV à couche fine depuis sa découverte en 1974.

Le silicium amorphe est une forme non cristalline du silicium c.à.d. que les atomes de silicium ont une structure désordonnée. Un important avantage de l'a-Si est une absorption élevée de la lumière, aux alentours de 40 fois celle du silicium cristallin. Ainsi une fine couche d'a-Si est suffisante pour fabriquer des cellules PV (1 seul micromètre au lieu des 200 micromètres d'épaisseur du silicium cristallin). Le silicium amorphe (a-Si ou a-Si:H) appartient à la catégorie de la couche fine de silicium et a plusieurs avantages. D'abord, l'a-Si nécessite plus de silicium et les substrats peuvent être faits à partir de matériaux peu coûteux

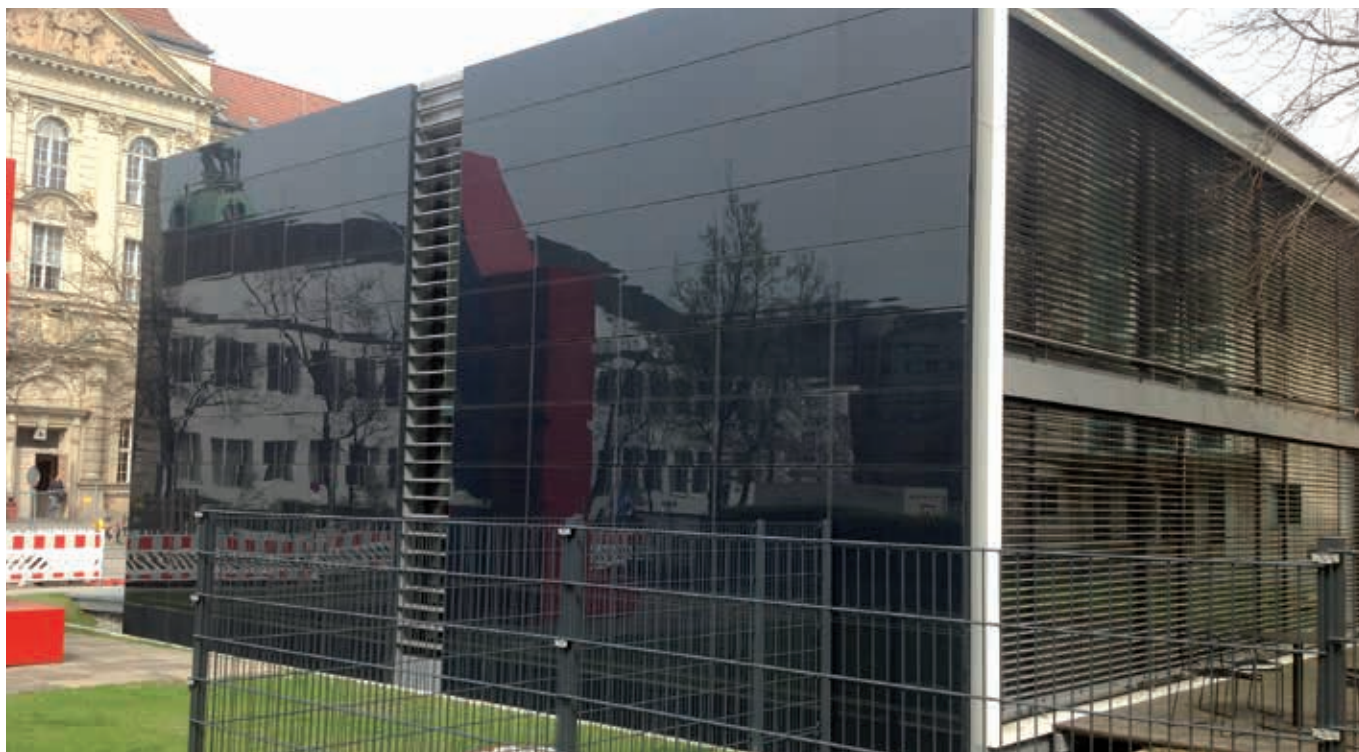


Fig 8 La maison Plus-Energy, Berlin

comme le verre, l'inox ou le plastique. Ce sont les deux raisons pour lesquelles le silicium amorphe pourrait bien devenir moins cher que les cellules mono et polycristallines. En plus, un module à couche fine flexible peut être posé sur des surfaces courbées et qui sont efficaces dans des conditions d'éclairage pauvres.

2.2.5 Le tellure de cadmium (CdTe)

C'est une technologie photovoltaïque se basant sur l'usage d'une fine couche de CdTe qui absorbe et convertit les rayons du soleil en électricité. En tant que semi-conducteur polycristallin fait à partir de tellure de cadmium, le CdTe possède un niveau d'absorption de lumière élevé et peut absorber 90% du spectre solaire.

L'avantage majeur de cette technologie est qu'elle peut être produite

à moindre coût que les panneaux basés sur le silicium. Il est également facile à produire surtout que le circuit qui rend possible la conversion de l'énergie solaire en électricités réside dans les propriétés propres de deux types de molécules de cadmium notamment le tellure de cadmium et le sulfure de cadmium. Ceci veut dire qu'un simple mélange de molécules remplit les propriétés requises, simplifiant ainsi la production par comparaison au procédé à plusieurs étapes qui joint deux types de silicium dans le même panneau.

Le tellure de cadmium absorbe la lumière du soleil à la longueur d'onde idéale captant l'énergie à des longueurs d'ondes plus courtes que celles possibles avec les panneaux de silicium. Ce matériau est disponible : le cadmium est abondant et produit à côté d'importants métaux industriels comme le zinc. Ceci évite que son prix balance à cause de celui du silicium. Pourtant, bien que leur prix soit un avantage, les panneaux à tellure de cadmium ont une efficacité assez faible de 10.5%, qui est plus faible que celle des cellules solaires à silicium. Bien que le cadmium soit abondant, le tellure ne l'est pas. C'est un élément très rare à trouver dans la nature. Une autre question serait la toxicité du cadmium, qui est l'un des 6 éléments les plus mortels.

2.2.6 Le diséléniure de cuivre-indium (CuInSe₂, ou CIS)

Les systèmes produits avec le diséléniure de cuivre-indium appartiennent à la famille du PV à couche fine. Un semi-conducteur polycristallin composé de cuivre, d'indium et de sélénium. Le CIS fait l'objet de beaucoup de recherches dans le domaine du PV à couche fine. Il suscite autant d'attention car selon les recherches, il possède le taux de conversion électrique théorique le plus élevé d'environ 18-19%. Le CIS est l'un des semi-conducteurs les plus légers avec 0.5 micromètres pouvant absorber 90% du spectre solaire.

Bien qu'ayant le dessus sur le CdTe, qui est affecté négativement par le problème de l'usage du cadmium lourd et du tellure rare, le développement commercial du CIS reste en retard par rapport à celui du CdTe.

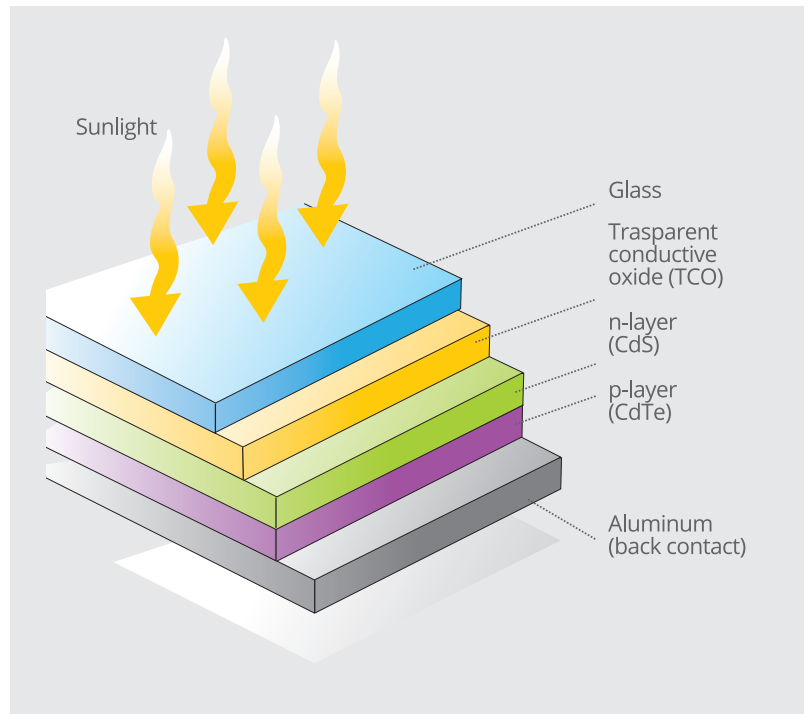


Fig 9 Le diséléniure de cuivre-indium

2.2.7 Le graphène

Le graphène est en cours d'examen pour remplacer le silicium. Fait de carbone pur, il est très conducteur, transparent et résistant. Du point de vue physique, il s'agit d'une molécule bidimensionnelle (0.35 nm d'épaisseur) d'atomes de carbone capables de porter les électrons à grande vitesse. Les matériaux conventionnels qui transforment la lumière en électricité comme le silicium et l'arséniure de gallium produisent un seul électron pour chaque photon absorbé. Puisqu'un photon contient plus d'énergie qu'un seul électron peut porter, la plus grande partie de l'énergie de la lumière est perdue en chaleur. Actuellement, de nouvelles études révèlent que quand le graphène absorbe un photon, il génère plusieurs électrons capables de conduire un courant. Ceci veut dire que si les dispositifs à graphène pour transformer la lumière en électricité portent leurs fruits, ils seront plus efficaces que ceux disponibles à nos jours.

Ce matériau peut également être utilisé avec toute longueur d'onde possible (aucun autre matériaux ne se comporte ainsi); il est flexible, robuste, peu coûteux et peut facilement être intégré à d'autres matériaux.

2.2.8 Le PV organique

Le PV organique semble attirer l'attention des chercheurs, changeant la tendance d'étudier l'efficacité énergétique des dérivés huileux comme l'huile de coton et de ricin, pour la production d'un revêtement pour promouvoir l'usage de matériaux renouvelables. Les graines de ricin produisent une résine similaire au nylon et le coton offre la solidité requise grâce à la cellulose qu'il contient.

Très récemment, des méthodes de production massives ont été développées se basant sur des technologies d'imprimerie qui ont permis de fabriquer des panneaux solaires organiques. Ce concept facilite l'application des panneaux sur les surfaces en intérieur et en extérieur. Dans ce cas, les panneaux solaires peuvent avoir environ 0.2 mm d'épaisseur et ceci inclut les électrodes et les couches de polymères où la lumière est recueillie. En plus, les graphiques peuvent être imprimés pour optimiser son apparence visuelle. Les panneaux solaires sont fabriqués avec des machines à imprimer selon les procédés tradition-



Fig 10 Des feuilles de carbones de graphène



Fig 11, Fig 12 Feuille organique photovoltaïque

nels tel l'impression en rouleau qui permet une production en masse rapide des produits : elle peut produire jusqu'à 100m de film par minute. La fabrication des cellules OPV est abordable car la consommation de matériaux est faible et ces derniers peuvent être recyclés après usage. Même s'ils semblent être une bonne solution pour l'intégration, étant flexibles et légers, leur efficacité est assez faible par rapport aux panneaux en silicium rigides, en plus d'une espérance de vie qui n'est pas assez compétitive.

2.3 La transparence

Les modules ont différents degrés de transparence; 10%, 20% ou 30% disponibles sur le marché, offrant l'avantage d'illuminer l'intérieur avec la lumière du soleil tout en évitant les rayons UV et infrarouges.



Fig 13 Panneaux solaires transparents

Ils consistent d'habitude en des cellules cristallines transparentes et souvent des modules avec un arrière transparent et des cellules cristallines standard. Une autre solution intéressante serait bien les modules à couche fine amorphe. Les modules transparents peuvent être utilisés pour le vitrage des fenêtres, les serres, et les toits. Ils font souvent partie de dispositifs de protection solaire amovibles et non amovibles.

2.4 Dimensions

Les systèmes PV sont modulables et très flexibles du côté design. En effet, la dimension du système est pratiquement toujours déterminée par l'espace disponible ou les besoins d'énergie dans la propriété. Elle dépend de plusieurs facteurs dont :

- La situation géographique
- L'espace disponible
- Le besoin annuel d'énergie
- La position du dispositif qui garantira une efficacité selon l'ombre et l'inclinaison.
- Le choix des modules PV, (certains modules PV produisent plus d'énergie par m² que d'autres)
- Le budget et les incitations

2.5 Forme

Les systèmes PV sont disponibles en plusieurs dimensions et formes selon le type de cellules dont ils sont faits, et ce sans limites. Ils peuvent être personnalisés, selon l'offre des fournisseurs.

Les nouvelles technologies comme le film PV flexible, peuvent être adaptés à toute surface, opaque ou transparente.



03

Intégration photovoltaïque





3.1 Définition

L'intégration du photovoltaïque aux bâtiments (BIPV) est une pratique qui permet l'usage des modules PV sur des éléments architecturaux faisant partie de l'ensemble et ayant une fonction précise. Elle est différente des PV rattachés aux bâtiments (BAPV) qui sont des rattachements aux bâtiments sans être liés directement à leurs structures fonctionnelles. Ainsi, le BAPV n'est pas le BIPV car ils ne sont pas intégrés à l'enveloppe extérieure des bâtiments ne remplaçant ainsi pas des éléments architecturaux comme le fait le BIPV.

Les modules PV intégrés peuvent être désignés comme intégrés quand le fait de les éliminer menace la fonctionnalité de l'enveloppe et le concept même du bâtiment. (Basnet, 2012)

Il est souvent possible de réaliser une intégration architecturale c.à.d. de bien intégrer les systèmes architecturalement de façon à optimiser l'esthétique du bâtiment. Pourtant, il ne serait pas toujours facile de le faire.

Souvent, les modules PV et les systèmes de collection des bâtiments sont tantôt architecturalement intégrés, tantôt intégrés aux bâtiments et parfois les deux à la fois. Ces systèmes n'ont pas besoin d'être intégrés aux bâtiments pour être architecturalement intégrés. On peut ainsi dire que toute intégration aux bâtiments est architecturale mais le contraire n'est pas vrai. Quand le processus de l'intégration améliore la qualité architecturale du bâtiment, on parle d'intégration architecturale. Ainsi, dans le cas du BIPV sur le toit, ce dernier peut être équipé avec des dispositifs photovoltaïques placés comme éléments extérieurs. Dans les deux cas, l'intégration peut bien optimiser l'esthétique du toit et du bâtiment ; on peut ainsi parler d'intégration architecturale. L'intégration ne veut pas dire que le PV est utilisé de façon à ne plus être reconnaissable. Il n'est pas nécessairement bien ou important que le PV intégré soit «caché» ou non visible. En pratique, le rendement énergétique de ces systèmes pourrait être sacrifié au profit de l'intégration architecturale. Ceci veut dire que dans la perspective d'employer ces systèmes de façon à améliorer l'expression architecturale des bâtiments, ils pourraient ne pas être placés dans les position, direction et orientation optimales. Il est nécess-

aire de faire des compromis, mais le meilleur serait de ne pas en faire. À cause de soucis pratiques, il faut quand même en faire. Nous devons être innovateurs et créatifs en s'attaquant à ce sujet.

Les termes éléments intégrés et BIPV désignent l'intégration d'éléments photovoltaïques à l'enveloppe des bâtiments, créant une parfaite harmonie entre le concept architectural, les propriétés fonctionnelles, et la conversion d'énergie. Les modules PV **remplacent ainsi les matériaux de construction conventionnels**, occupant leurs fonctions. Bien que cette idée ne soit pas nouvelle, elle n'est pas généralement adoptée à cause des défis architecturaux qu'elle implique.

L'intégration aux bâtiments concerne l'intégration physique d'un système PV à un bâtiment en insistant sur l'impression générale que ce procédé lui offre. Pour un architecte, le côté esthétique, plutôt que l'intégration physique, est la raison pour laquelle on parle d'intégration aux bâtiments. La situation optimale serait un système physiquement et esthétiquement bien intégré. En effet, plusieurs exemples d'intégration physique souffrent d'un manque d'intégration esthétique. L'analyse visuelle des systèmes solaires montre que l'aspect d'un bâtiment mal conçu ne s'améliore pas, même en rajoutant un dispositif bien conçu.

Par ailleurs, un bâtiment bien conçu avec un système solaire bien intégré sera accepté de tous (Reijenga and Kaan, 2003).

L'intégration du PV est influencée et guidée par certains critères pour assurer la qualité du processus. Il y a certaines questions architecturales à considérer en intégrant ces systèmes aux bâtiments. Ces questions sont importantes pour assurer une intégration architecturale de qualité. Pour ce, les aspects fondamentaux du bâtiment comme les côtés fonctionnels, constructifs et formels doivent être assurés (Probst et Roecker, 2011). La qualité de l'intégration architecturale du PV et des collecteurs solaires peut être définie comme le résultat de leur intégration contrôlée et cohérente simultanément d'un point de vue fonctionnel, constructif et esthétique (Probst et Roecker, 2011).

3.2 Méthodes d'intégration du PV

3.2.1 L'approche d'intégration d'efficacité énergétique BIPV

La réduction de la consommation d'énergie et l'emploi d'énergie renouvelable deviennent de plus en plus importants en matière de développement durable dans le domaine de l'architecture. À l'ère des bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle, l'architecte a l'obligation d'informer les propriétaires des immeubles des avantages de bâtiments efficaces énergétiquement qui peuvent réduire la demande en énergie (avec certains coûts environnementaux et économiques). Ainsi, l'architecte doit avoir ces connaissances et les outils pour promouvoir le BIPV. Si le BIPV est pris en compte dès le départ, le concept architectural peut devenir une façon d'assurer une meilleure intégration esthétique, constructive, énergétique et économique du PV. Vue la popularité grandissante des systèmes PV, il est nécessaire d'en empêcher l'usage abusé dans les bâtiments. Il faut ainsi que les professionnels de la construction sachent qu'ils peuvent compter sur les technologies PV les plus innovatrices : l'intégration constructive et architecturale des éléments photovoltaïques (BIPV). Faisant partie de l'enveloppe des bâtiments, les systèmes BIPV permettent de réduire le coût initial des investissements, les matériaux et la main-d'œuvre nécessaire pour leur mise en place contrairement à la construction traditionnelle où les modules PV ne remplacent pas les éléments du bâtiment. Le BIPV est une technologie multifonctionnelle qui s'adapte bien aux bâtiments nouveaux et ceux qui existent déjà. Ceci lui permet d'être une technologie en pleine croissance en matière de PV.

3.2.2 L'intégration esthétique et multifonctionnelle

Le concept du BIPV implique traditionnellement en matière d'architecture et de construction deux aspects complémentaires :

- Le premier est la multifonctionnalité des éléments solaires dans leur intégration constructive et fonctionnelle.
- Ensuite, il y a l'intégration esthétique qui désigne la qualité architecturale de cette intégration.

Une intégration fonctionnelle désigne le rôle que jouent les modules PV dans les bâtiments.

On parle ainsi d'une multifonctionnalité ou d'un critère à double fonction. Les modules PV sont considérés comme intégrés s'ils sont un élément du bâtiment. Les fonctions du bâtiment dans le contexte du BIPV peut manifester un ou plusieurs de ces aspects :

- Protection du climat: pluie, neige, vent, grêle, radiation UV;
- Rigidité mécanique et intégrité structurelle;
- Protection thermique et solaire;

L'intégration esthétique désigne par ailleurs le concept du bâtiment et l'apparence, et est plus difficile à définir de façon unique. L'intégration esthétique (morphologique) est la capacité du PV à définir le langage architectural du bâtiment. En architecture contemporaine, l'apparence est l'un des facteurs clefs pour reconnaître les bâtiments et il y a une nouvelle tendance d'architecture solaire.

Par ailleurs, une définition esthétique ne peut pas déterminer objectivement ce qui est esthétique en matière d'intégration mais peut aider les architectes et propriétaires de bâtiments avec quelques références:

- La position et les dimensions des modules doivent être cohérentes avec la composition architecturale du bâtiment
- Le module PV doit être visible: la texture de la surface et la couleur doit être compatible avec les autres matériaux, couleurs et textures du bâtiment.
- La taille et la forme du module doivent être compatibles avec la composition du bâtiment et le format des autres éléments de la façade.
- Les jonctions doivent être faites avec beaucoup d'attention car elles soulignent le réseau des modules avec le bâtiment.

3.2.3 Intégration PV par éléments du bâtiment (toit, façades et ouvertures)

Sur le toit, le PV peut être intégré en:

- Changeant une partie existante du toit avec des cellules photovoltaïques assemblées directement sur les tuiles ou avec des modules de même forme et de même taille que les éléments de bâtiments existants. Les produits en tuiles peuvent couvrir tout le toit ou juste une partie. Ils sont normalement arrangés en modules avec l'apparence de tuiles standards et peuvent en remplacer un nombre facilitant ainsi la rénovation des toits. Le type de cellules et la forme des tuiles peuvent varier : quelques produits en tuiles ressembleraient aux tuiles en céramique courbées et n'auront pas la même efficacité



Fig 1 Académie de Mont Cenis, Emscher Park, Ruhr

- à cause de leurs forme, mais seront plus agréables esthétiquement.
- L'emploi de panneaux transparents ou semi-transparentes pour créer un toit complètement transparent ou pour assurer l'ombre. Les formes peuvent varier : plats, inclinés ou arrondis.
 - Les produits en feuilles, plus légères et flexibles, facilitent leur installation sans devoir se soucier du poids sur le toit. Les cellules PV sont souvent faites à partir de cellules à couche fine pour maintenir la flexibilité des feuilles et leur efficacité face aux températures élevées. Les produits PV en feuilles ont un facteur de remplissage faible des cellules à couche fine, tout comme leurs résistance. Pourtant, il est possible de modifier l'angle d'inclinaison du produit pour mieux en profiter. Les tuiles sont souvent petites, il faut alors en augmenter l'efficacité.

En matière de murs verticaux en extérieurs le PV peut être utilisé de différentes façons comme façades:

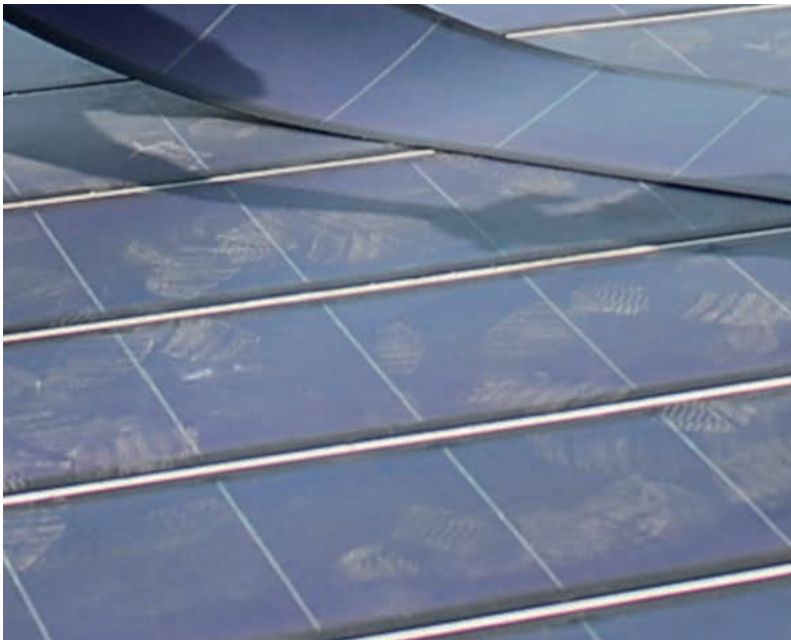


Fig 2 Film fin PV flexible

- Revêtement extérieur intégré aux murs. Dans ce cas, la surface de PV doit être résistante mécaniquement et thermiquement.
- Les façades ventilées ont une double façade pour refroidir les modules PV à l'air ambiant. Ventiler les façades BIPV offre des avantages du point de vue électrique et thermique.
La circulation de l'air à l'arrière des panneaux PV les refroidit et améliore leur performance électrique.
Les façades ventilées impliquent une température plus faible du mur derrière les modules et ainsi moins à refroidir en été.
En plus, un écoulement d'air contrôlé derrière la façade PV peut bien impliquer un usage potentiel de l'air chaud en hiver pour le préchauffage.
- Murs-rideaux: Les systèmes de murs-rideaux sont une technologie qui a fait ses preuves et est utilisé dans plusieurs projets notamment dans les bureaux. Le système "mullion/transom stick" est très commun. Les zones de vision sont normalement double-vitrées et



Fig 3 Façade ventilée PV, construite pour le décathlon solaire européen, 2010

les zones de non vision sont faites de verre opaque ou de panneaux de métal isolés. Les modules PV peuvent être facilement intégrés comme unités double-vitrées. Les panneaux extérieurs peuvent être laminés avec une résine de verre photovoltaïque et les vitres intérieures sont isolés. L'épaisseur du module doit être en dessous de 30mm. Plusieurs designs sont disponibles. Par exemple, une façade consisterait en une combinaison de zones de visions vitrées et des panneaux PV opaques ou même des modules PV à zones opaques et transparentes.

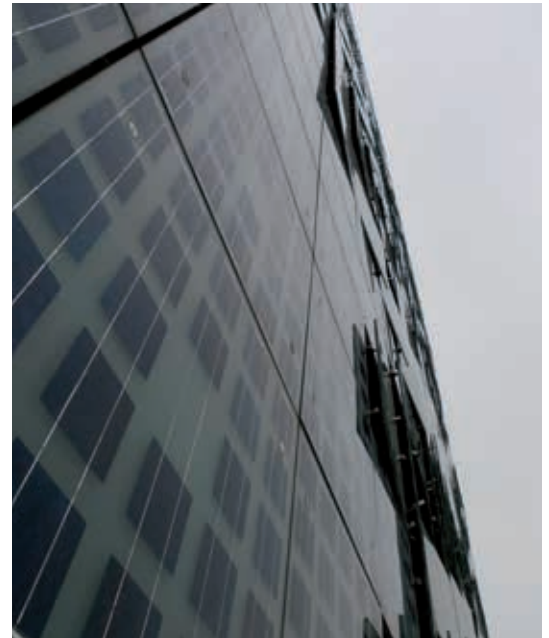
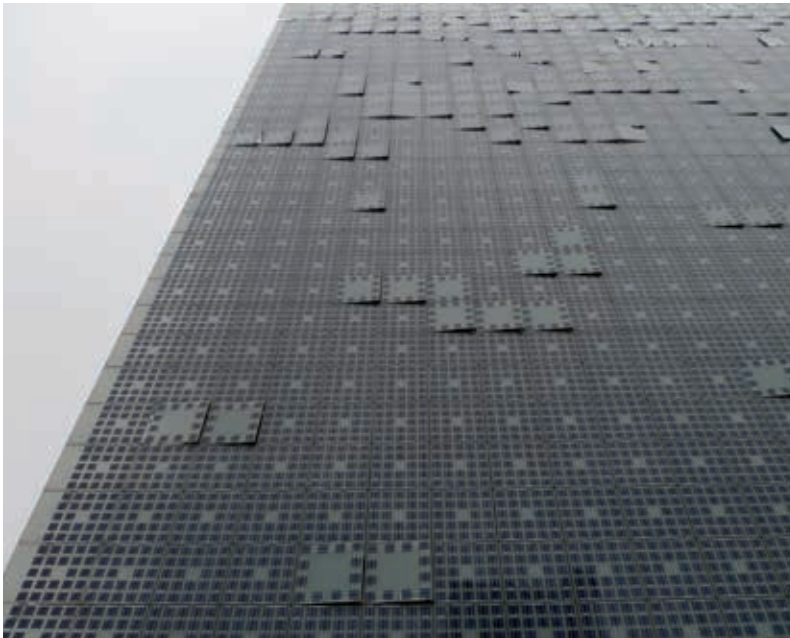


Fig 4a, 4b Système PV en mur-rideau.

- Revêtement anti-pluie: Ils consistent en une série de panneaux (souvent recouverts d'aluminium) installés aux extrémités du bâtiment (par exemple, sur les balustrades), pour la ventilation et le drainage. Ils sont très appropriés pour l'intégration PV. La fente de ventilation (qui doit être de 100mm ou plus et sans obstruction) a l'effet positif de réduction des températures améliorant ainsi la

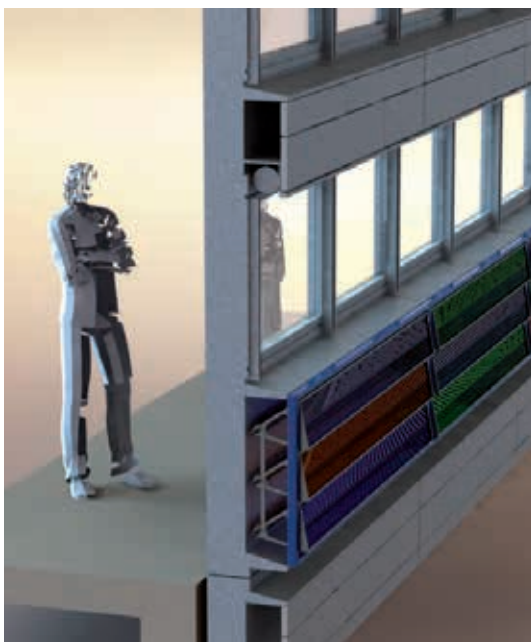


Fig 5a, 5b, 5c Offre d'intégration de la technologie CPV dans des bâtiments



performance du système et laissant de l'espace pour les câbles.

- Les façades chaudes: Il s'agit d'un mur-rideau avec des panneaux mur creux non ventilés qui assurent l'imperméabilité de la façade extérieure. Cette dernière rassemble des panneaux en trompes faits d'éléments transparents isolés. Les deux panneaux à mur creux et éléments transparents sont rattachés aux murs intérieurs avec des profils. Les profils sont équipés d'un isolateur pour éviter la fuite thermique. Les panneaux vitrés et les éléments transparents sont joints soigneusement à la structure porteuse de l'ensemble donnant ainsi lieu à la possibilité de monter des éléments de grande taille.
- Façades froides: Il s'agit d'un mur-rideau avec des panneaux mur creux ventilés, permettant à l'air ambiant de pénétrer la cavité. Les éléments de la façade à l'extérieur de la cavité murale joue le rôle d'une anti-pluie et assurent l'imperméabilité du matériau d'isolation. La partie intérieure de la cavité est hermétique et isolée. La façade froide est souvent installée suivant le système stick ou la technique de montage à l'échelle.

- Les produits de vitrage solaire : Ils offrent une variété d'options pour les fenêtres, les façades/toitures vitrées et carrelées. Différentes couleurs et degrés de transparence permettent d'obtenir des résultats esthétiques différents. Les modules de vitrage solaire transmettent la lumière du jour et protègent du soleil et des précipitations et du soleil. La distance entre les cellules solaires (3 à 50mm) dépend du niveau de transparence voulu et des critères de production d'électricité. L'espace entre les cellules diffuse la lumière. Ainsi, l'ombre et la lumière naturelle sont assurés tout en produisant de l'électricité. Très bien adaptée au climat chaud, cette technologie pose le problème de trouver un compromis entre la solution et la production d'énergie, évitant le problème de surchauffe



Fig 6 Hôpital Meyer, Florence, Italie

causé par l'effet de serre dans les pays méditerranéens.

- Systèmes de protection solaire: L'intégration du PV comme systèmes extérieurs de protection solaire est l'un des moyens les plus efficaces pour contrôler la lumière du jour et la température à l'intérieur d'un bâtiment. Elle empêche la chaleur de passer à travers le bâtiment, assouvissant les besoins de ventilation et de refroidissement tout en produisant de l'énergie. Si l'on installe un système contrôlable, des réflecteurs enregistrent la position du soleil pour une production PV optimale tout en évitant la surchauffe. De même, en hiver, les réflecteurs peuvent être ajustés de façon à ce que les bâtiments profitent de la chaleur du soleil et peuvent être fermés la nuit pour réduire les pertes de chaleur.



Fig 7 Brises-soleil photovoltaïques



Fig 8 Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya (mNACTEC), Terrassa



Fig 9 Académie de Mont Cenis, Emscher Park, Ruhr



Fig 10 Académie de Mont Cenis, Emscher Park, Ruhr

- Atrium/lucarnes: Le PV peut être intégré en éléments multifonctionnels dans les structures transparentes des toits et des atriums permettant ainsi de contrôler la lumière à l'intérieur. En tant qu'unités de toit semi-transparentes, ils peuvent protéger le bâtiment du soleil, de la chaleur, et du mauvais temps. Une façon de les intégrer serait d'installer des petites cellules PV sur le verre des atriums créant des vides transparents entre elles de façon à permettre à la lumière de pénétrer l'intérieur du bâtiment. Les atriums PV bien conçus peuvent être un atout pour le bâtiment vu de l'intérieur. Ces systèmes de vitrage, bien qu'appropriés aux systèmes PV à petite capacité, peuvent être visuellement attirants tout en offrant une visibilité optimale. Les lucarnes, atriums et serres étant traditionnellement colorées pour réduire les reflets, le vitrage PV semi-transparent serait une bonne solution.

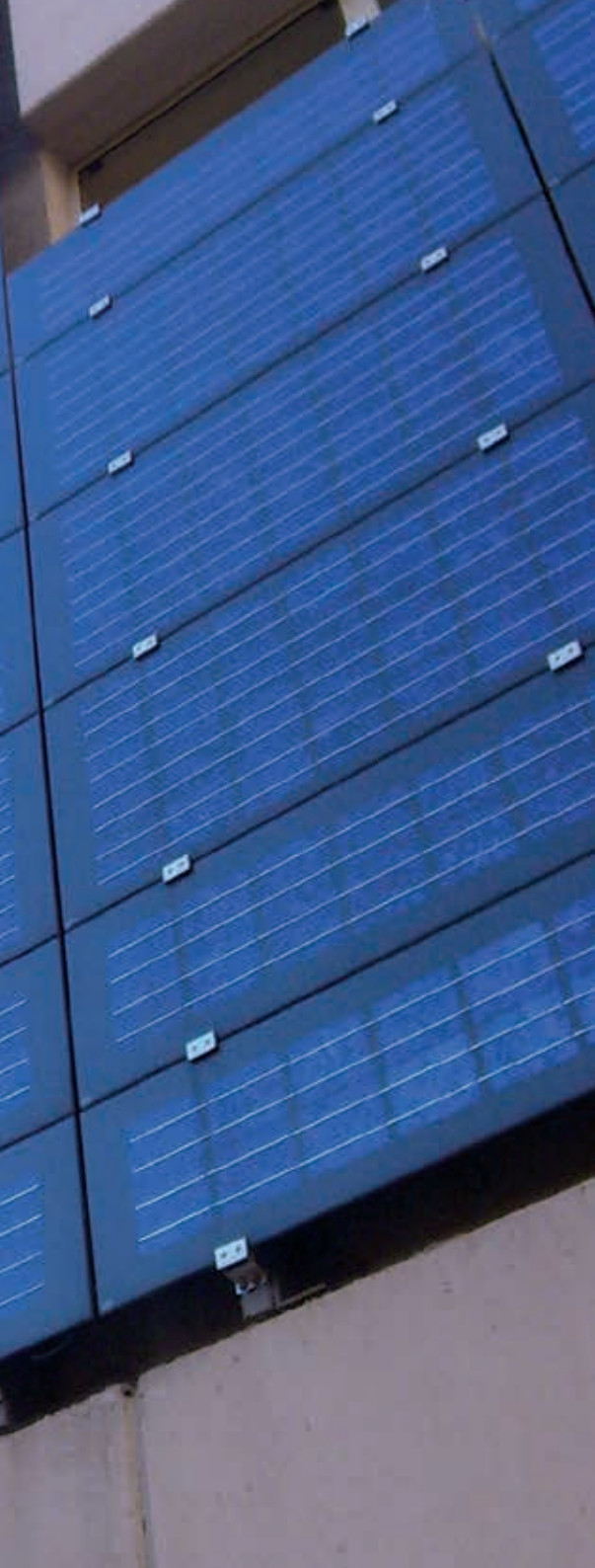
Les modules BIPV sont très similaires aux modules PV conventionnels. La différence réside dans le fait qu'ils sont fabriqués de façon à résister au climat. Quelques produits pourraient remplacer les toits ou quelques surfaces de ces derniers. Les systèmes de montage facilitent l'installation.

Il y a beaucoup de produits sur le marché dont quelques-uns promus comme produits BIPV n'étant en effet que des produits de protection contre les intempéries. D'autres produits ne sont pas spécifiques sur le mode de montage, prêtant à confusion entre le BIPV et le BAPV. Quelques modules BIPV sont faits de modules avec isolation thermique ou autres éléments

04

Améliorer la perspective sociale, institutionnelle et des concepteurs de bâtiments





4.1 BIPV comme valeur ajoutée pour le bâtiment

L'intégration des systèmes PV aux bâtiments remplaçant les toits, les fenêtres, la protection solaire et les façades vitrées offrant l'opportunité de limiter les coûts en remplaçant les matériaux conventionnels de construction avec des matériaux PV. À comparer avec le verre, le métal, la pierre ou tout autre matériau, le PV ne rajoute que quelques dépenses marginales au coût du chantier. Par ailleurs, les systèmes PV offrent quelques bénéfices non négligeables en termes économiques et environnementaux :

- 1 Ils sont désormais abordables dans plusieurs pays à cause des incitations.
- 2 Ils sont sources d'économies immédiates en termes de production d'électricité.
- 3 Ils contribuent à la réduction des émissions de CO₂.
- 4 Augmenter la valeur économique du bâtiment une fois la technologie installée.
- 5 Ils n'ont pas besoin d'entretien particulièrement coûteux.

4.2 Pertinence des différents acteurs du procédé d'intégration

Le BIPV est le fruit de l'interaction de plusieurs acteurs : le propriétaire du bâtiment, le concepteur-architecte, le financier potentiel, le constructeur, l'électricien, et l'administration locale. Ils participent tous à bien intégrer un système PV. On ne peut pas en négliger aucun car chacun joue un rôle important.

4.3 Le rôle des architectes et des concepteurs de bâtiments

Intégrer le PV aux bâtiments dépend largement des connaissances des architectes et concepteurs de cette technologie (en tant que matériau de construction), ses qualités esthétiques, la finition, la résistance aux intempéries, les limitations d'accès de la lumière du soleil, la performance, les produits disponibles, les garanties et les coûts. Le concepteur s'intéresse à comment le PV peut faire partie d'un concept éthique tout en prenant en compte la question de l'énergie et du côté esthétique.

Les architectes doivent conseiller leurs clients sur les options et doivent bien se renseigner en matière des économies qu'engendrent les produits BIPV, leurs valeurs ajoutées, les effets de serres qu'ils aident à éviter, la connexion au réseau et le stockage d'énergie, la fiabilité et les risques de défaillance des systèmes. Alors, qu'il est important qu'ils fassent attention à tout cela, leurs informations techniques ne doivent pas être nécessairement très approfondies. À l'étape du concept, on se concentre sur l'esthétisme, la durabilité, la résistance face aux intempéries, et des limitations d'accès au soleil.

4.4 Améliorer la conscience des citoyens

Le propriétaire/client d'un projet de construction prend la décision d'intégrer le PV au concept général, qu'importe la taille du projet.

Cette décision est régie par plusieurs facteurs comme le coût, le rendement, et la valeur ajoutée quand il s'agit de savoir comment le PV s'applique à la solution énergétique et à l'esthétisme du bâtiment.

Un facteur important est l'engagement du propriétaire à un bâtiment avec un impact minime sur l'environnement à long terme. Ainsi, le coût pourrait jouer un rôle minime dans la prise de décision bien que, le propriétaire montrera en tous cas son engagement à la responsabilité environnementale. Les propriétaires doivent être convaincus des aspects du BIPV par ceux qui les promeuvent:

- **Électriques:** (les kWh produits; la synergie avec les autres formes d'énergie comme le réchauffement et le refroidissement, à travers l'isolation et la protection solaire; baisse de la demande en électricité; énergie en cas d'urgence; support du réseau pour les zones rurales; transmissions réduites et pertes de distribution; contrôle du voltage; régler la fluctuation du courant);
- **Environnemental:** (satisfaction de la clientèle qui souhaite avoir des produits écologiques; génération d'énergie assez conséquente; émissions de CO2 réduites ; réduction des pluies acides et de la brume ; moins d'usage des centrales électriques ; impact réduit du développement urbain);

- **architectural:** La portée intrinsèque de l'architecture et de l'esthétique ; substitution des éléments de construction ; potentiel de multifonctionnalité pour l'isolation ; imperméabilité ; protection contre les incendies et le vent ; contrôle du son ; lumière du jour ; protection solaire ; isolation et dissipation thermique ; esthétique à travers la couleur, la transparence, les surfaces antireflets ; moins d'entretien du bâtiments et moins d'éléments à remplacer sur le toit.);
- **socioéconomiques:** Augmenter la valeur du bâtiment en installant du PV; prestige et opportunités de marketing ; nouveaux produits, industrie et marché ; création d'emplois pour l'installation et l'entretien ; choix local, usage et contrôle des ressources ; installation et construction rapide ; installation facile car modulable ; moins d'importation de combustibles ; développement rural ; moins de coûts de transport et de pollution des combustibles fossiles dans les zones rurales ; symbole d'un développement durable s'associant à l'éducation écologique;
- **Sécurité de l'approvisionnement:** L'augmentation de la consommation d'électricité surcharge les centrales et les réseaux de distribution ce qui affecte la sécurité de l'approvisionnement et la qualité de l'énergie. Les systèmes PV se caractérisent par des petites unités situés près des domiciles des consommateurs qui utilisent les sources d'énergie renouvelable locales. Ceci optimise la fiabilité du réseau et la qualité de l'énergie qui est importante pour les équipements électroniques.

Un système BIPV est inclus dans le budget de construction du bâtiment. Les propriétaires doivent être informés que l'électricité produite par ce système réduit la quantité d'électricité à acheter du réseau et par conséquent, les coûts de construction.

Un système BIPV peut également permettre au constructeur de réduire le coût de construction, améliorer la fiabilité et la qualité de l'énergie et dans quelques pays, profiter d'incitations. Les économies réalisées peuvent avoir lieu de plusieurs façons qui affectent le profil fiscal de l'investisseur.

Les propriétaires de bâtiments commerciaux peuvent profiter du BIPV dans le cadre des objectifs stratégiques de la société, ses intérêts ou sa mission managériale.

Avec un système BIPV multifonctionnel, des coûts additionnels et des avantages peuvent ne pas être évidents à cause des méthodes de comptabilité, mais affectent tout de même les budgets directement et indirectement. Une organisation, par exemple, pourrait allouer un crédit pour le BIPV pour la réduction des émissions si elles peuvent être quantifiées, estimées et même commercialisées. Pourtant, si un intérêt économique ne peut pas être compris par un preneur de décision, il ne fait généralement pas partie de l'analyse de l'investissement.

Même si les avantages du BIPV sont subjectifs et délicats à quantifier, on peut pourtant lui attribuer une image positive et une bonne perception du public envers un bâtiment avec un PV installé.

4.5. L'intégration selon l'âge du bâtiment (historique/récent)

On donne une attention particulière à l'intégration du PV aux bâtiments historiques. Ceci inclut tous les bâtiments considérés comme étant historiques selon les lois de chaque pays, et même ceux qui indépendamment des lois, ont préservé des caractéristiques particulières.

En général, en installant un nouveau système sur un bâtiment existant, il est important de:

- Choisir un concept qui prend en compte l'efficacité énergétique de façon à réduire les besoins en énergie du bâtiment. Ceci lui donnera plus de confort et économisera de l'argent tout en permettant au système BIPV de réduire le fardeau du réseau.
- Un concept adapté au climat et à l'environnement local: Les concepteurs doivent comprendre l'impact du climat et de l'environnement sur la production d'énergie. Les jours froids et clairs l'augmenteront alors que les jours chauds la réduiront.

Les concepteurs doivent faire attention que:

- Les surfaces qui réfléchissent la lumière sur le dispositif (comme la neige) aideront à augmenter la production énergétique;

- Les dispositifs doivent être conçus de façon à supporter le poids de la neige et la force du vent;
- Les dispositifs bien inclinés élimineront la neige plus facilement;
- Les dispositifs dans des environnements secs, poussiéreux ou dans un milieu industriel ou de transport auront besoin d'être nettoyés pour limiter les pertes d'efficacité.
- Remédier aux questions de planification du site et d'orientation: tôt dans la phase de concept, s'assurer que le dispositif solaire reçoit le maximum d'exposition au soleil et ne sera pas entravé par des obstacles comme les bâtiments et les arbres. Il est important que le système ne soit pas à l'ombre durant les heures d'ensoleillement de pointe. L'impact de la protection solaire sur le dispositif est plus important sur la production électrique que l'empreinte de l'ombre.
- L'orientation des dispositifs peut influencer la production d'énergie annuelle du système : avec des systèmes inclinés, on peut produire 50 à 70% plus d'énergie qu'une façade à la verticale.
- Il est possible d'intégrer la lumière du jour et le PV en utilisant des films à couche fine semi-transparentes ou des modules cristallins avec des cellules espacées entre deux couches de verre. Les concepteurs peuvent utiliser le PV pour intégrer la lumière du jour aux façades, aux toits et aux lucarnes. Les éléments BIPV peuvent aider à réduire l'effet du refroidissement et les reflets généralement associés au vitrage.
- Ils peuvent intégrer les modules PV aux dispositifs de protection solaires: les systèmes PV conçus comme "sourcils" ou stores pour les surfaces vitrées peuvent assurer assez d'ombre passive. Quand les dispositifs de protection solaire sont considérés dans le cadre d'un concept d'intégration, la capacité de refroidissement peut être réduite ou même supprimée.
- Ils peuvent choisir entre les systèmes indépendants et ceux qui sont connectés au réseau: la plupart des systèmes BIPV seront connectés au réseau l'utilisant pour le stockage et comme réserve. Les systèmes doivent être conçus de façon à répondre aux besoins des gens qui ont des contraintes d'espace et de budget. Ils faut choisir les onduleurs en prenant en compte les besoins du système.

- Pour les systèmes indépendants actionnés par le PV uniquement, le système, stockage inclut, doit être fait de façon à s'adapter au maximum et au minimum de production prévue. Pour éviter l'excès, du système PV dans les périodes occasionnelles de consommation de pointe, on utilise des générateurs.
- Si les périodes de consommation de pointe ne correspondent pas à la production d'énergie, il serait économiquement approprié de rajouter des batteries connectées au réseau pour réduire les coûts quand la demande augmente. Ce système pourrait agir comme un système UPS.
- Assurer la ventilation appropriée: L'efficacité de la conversion PV peut être réduite à cause des températures élevées. Ceci est encore plus vrai avec les cellules PV au silicium que les cellules à couche fine de silicium amorphe. Pour optimiser l'efficacité, il faut assurer une couche d'air sous les cellules solaires pour permettre la ventilation des modules et dissiper la chaleur.
- Évaluer l'usage des systèmes thermiques solaires hybrides: Pour optimiser l'efficacité du système, le concepteur pourrait choisir de capter et d'utiliser l'énergie solaire thermique développée en chauffant les modules. Ceci peut être intéressant dans les régions à climat froid pour le réchauffement de l'air de ventilation.
- Considérer l'inclinaison des dispositifs BIPV, car les cellules solaires doivent suivre l'inclinaison du toit ou du mur.
- Se rappeler que les cellules solaires peuvent être incorporées à la façade des bâtiments pour remplacer ou compléter le verre traditionnel. Ces installations se font souvent à la verticale réduisant l'accès aux ressources solaires mais ceci est compensé par les grandes surfaces des bâtiments.
- Savoir que le PV peut être intégré aux stores ou aux designs en dents de scie dans les façades des immeubles. Ils augmentent l'accès direct aux rayons du soleil tout en assurant les avantages d'une telle protection solaire.
- Savoir que l'emploi du PV dans les toits peut remplacer les matériaux conventionnels de toiture et l'asphalte comme solution pour assurer l'imperméabilité.

- Employer le PV dans les lucarnes peut avoir un effet économique et esthétique positif.
- Professionnels: L'emploi du BIPV est assez récent.

Assurer que les professionnels du concept, de l'installation et de l'entretien soient bien formés, certifiés et aient assez d'expérience avec le PV. Les bâtiments existants ou historiques, comme les bâtiments nouveaux, offrent beaucoup de possibilités pour les systèmes PV intégrés. Pourtant, les applications sur bâtiments existants ont tendance à être moins réussies que sur les nouveaux bâtiments, car elles doivent s'adapter à une situation existante. Les produits standards étant souvent inapplicables, il faut avoir recours à des approches innovatrices avec des produits personnalisés (Hermannsdorfer and Rub, 2005). Il n'est pas toujours facile d'opérer une intégration dans un bâtiment existant à cause de plusieurs contraintes. L'intégration doit être planifiée selon la situation du chantier, qui peut varier d'un bâtiment à l'autre.

Quand il s'agit de bâtiments historiques importants, il se peut que les systèmes PV doivent être intégrés dans des endroits étrangers au bâtiment même. Ceci veut dire que les annexes à la propriété peuvent être utilisées pour le BIPV ou pour l'application sur des bâtiments de service comme les garages et les dépôts.

05

Performance et dimensionnement du BIPV





5.1 La physique du photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être définis comme un appareil capable de convertir l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.

Si on considère que le rayonnement solaire est presque infini et que la diffusion des appareils électroniques et en hausse, on ne peut pas ainsi passer outre de l'importance de la technologie PV.

L'usage des panneaux photovoltaïques sur les bâtiments a prouvé son efficacité en tant que stratégie même si elle a été poussée par les campagnes nationales d'incitations. Les technologies PV ont eu besoin de ces incitations car le coût de production des panneaux était élevé et leur efficacité faible. En effet, un panneau PV ne peut théoriquement convertir que 20% de l'énergie qu'il puise du soleil. Ainsi, dans des conditions optimales, le panneau reçoit 1000 W/m^2 d'énergie solaire pour ne produire que 200 W/m^2 d'électricité. Ainsi pour 1 KW d'énergie, il faut en installer plus de 5m^2 . Dans la dernière dizaine d'années, le coût des panneaux PV a baissé de la moitié et 1 KWp coûte plus au moins 2.500,00€. En prenant toute ceci en compte, il nous est évident combien il est important d'opérer une intégration rationnelle de ces éléments aux systèmes du bâtiment de façon d'assurer un fonctionnement optimal. L'emploi de cette technologie est un exercice important pour le design des façades et du toit proportionnellement à la capacité d'absorption maximale des panneaux solaires et par conséquent en fonction du parcours solaire et de son orientation.

L'avantage de cette technologie est l'usage facile et la longévité. Un panneau PV n'a pas de pièces amovibles et est extrêmement résistant. Il est fait principalement de silicium qui est un matériau peu dégradable. Le principe du fonctionnement du panneau PV se base sur les propriétés de ses matériaux semi-conducteurs pour exciter les électrons du cortège électrique une fois exposés à un rayonnement. Les matériaux semi-conducteurs les plus répandus sont ceux faits en silicium. Quand un photon à l'énergie appropriée (égale à $e=hv$ ou h est la constante de Planck et v est la fréquence du rayonnement) heurte un électron sur son cortège, il donne assez d'énergie pour la pousser à un niveau d'énergie supérieur et la mettre en état conducteur.

Pourtant, pour créer un flux d'électrons, c.à.d. un courant électrique, il ne suffit pas d'exciter un électron du silicium mais de créer un champ électrique important avec ces matériaux. Si ceci n'a pas lieu, l'électron subit naturellement l'effet de «recombinaison» retombant à nouveau dans le cortège électrique de l'atome qui reprend sa configuration initiale.

L'effet de la recombinaison est l'une des causes principales de la faible efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité. L'autre cause fondamentale réside dans le fait que tout le rayonnement solaire ne peut pas proprement exciter les électrons de la surface semi-conductrice. L'énergie des photons doit s'inscrire dans un certain intervalle. Comme on l'a mentionné, l'excitation des électrons périphériques des atomes de silicium ne doit pas être suffisante pour créer un courant électrique, s'il n'y a pas de champ électrique capable de les faire bouger d'une facette du panneau à l'autre. Ceci se produit en mélangeant ou comme on le dit, «dopant» le silicium avec d'autres substances.

Le silicium pur a une structure cristalline tétraédrique. Chaque atome a une liaison avec 4 atomes. Le silicium est rattaché dans sa partie supérieure avec le phosphore (P, Z= 15) et dans sa partie inférieure avec le Bore (B, Z=5).

Le Bore a 3 électrons dans sa dernière périphérie, et puis inséré dans le réseau de l'atome de silicium, il a un électron de valence non lié. Par ailleurs, le Phosphore qui a 5 électrons dans sa dernière périphérie, entre en réseau sans combinaison d'électrons. Les électrons libres du silicium attirent ceux du phosphore qui sont faiblement attachés au noyau du P dopé, c.à.d. le côté inférieur de la cellule. Ceci crée ce que l'on appelle liaison P-N.

L'équilibre des liaisons est rétabli mais celui des charges est interrompu. Les électrons de Phosphore migrants ont créé un déséquilibre des charges négatives du côté inférieur de la cellule. Ceci veut dire qu'elle crée un champ électrique qui a le potentiel de faire bouger les électrons libérés par effet photovoltaïque. Ces derniers migrent naturellement vers la partie supérieure de la cellule, chargée positivement. Les atomes de silicium laissés par les électrons excités par le rayonnement solaire en attireront d'autres dans la partie inférieure de la cellule. Si les deux faces de la cellule sont connectées par un conducteur, ceci créera un flux d'électrons (courant électrique), pouvant alimenter une charge.

L'élément est complété par une couche d'oxyde de titane pour réduire les reflets and permettre à la cellule d'absorber le maximum du rayonnement. L'épaisseur de la cellule ne dépasse pas les 0.4 mm. Reste à comprendre ce qui advient du rayonnement non converti en électricité. Cette énergie est convertie en chaleur ce qui augmente la température du panneau pour être ensuite dissipée dans l'environnement.

5.2 Évaluer la performance énergétique du BIPV

Dès la phase initiale du concept du BIPV, il est important de savoir dans quelle partie du bâtiment on peut placer les panneaux solaires. Ceci requiert une bonne compréhension des conditions climatiques du site, comment les rayons du soleil se déplacent à travers les saisons (selon la latitude) et les surfaces des bâtiments qui sont susceptibles d'être exposés au soleil loin de l'ombre.

Le bon accès au rayonnement direct est important si l'on veut assurer une production optimale d'énergie sur un an. Mais il y a une flexibilité dans la détermination de la position qui peut permettre un fonctionnement optimal des panneaux solaires.

Dans les littoraux nord et sud du bassin méditerranéen et dans la région du Moyen-Orient, les surfaces de construction qui ont une orientation horizontales ou vers le sud seront bien exposés au soleil. La règle d'or serait que le panneau soit orienté vers le sud et incliné à un angle égal à la latitude du lieu où il est installé. Par exemple, la latitude de Cagliari est 39° N, ainsi il faudrait orienter le panneau vers le sud et l'incliner à 39° à l'horizontale pour assurer une exposition au soleil optimale. Ceci n'est pas toujours vrai car quelques paramètres locaux (par exemple, le niveau de nuages dans certaines périodes) peuvent influencer le niveau de rayonnement solaire. C'est pour ces raisons-là qu'à Cagliari, une inclinaison de 30° est recommandée.

Les panneaux solaires n'ont pas besoin d'être orientés de façon optimale pour assurer une production adéquate. Invariablement, des remaniements des caractéristiques du bâtiment, comme l'angle du toit, seront nécessaires. Par conséquent, la demande de confort à l'intérieur et certains tarifs peuvent favoriser quelques surfaces exposées au sud-ouest et produire de l'énergie dans l'après midi pour réduire le besoin d'énerg-

ie pour la climatisation et la charge de pointe. Ceci est assez pertinent dans les bâtiments commerciaux.

Pour la plupart des technologies PV, sauf le silicium amorphe, plus la température est élevée plus l'efficacité est faible. Les modules PV fonctionnent très bien dans les périodes d'ensoleillement mais des températures assez faibles (moins de 25°C). Ils génèrent un courant continu (DC) et cette énergie est évaluée par le producteur selon les conditions normales d'essai. Ces dernières mesurent la performance des panneaux dans des conditions artificielles. Elles répliquent l'air ambiant à 25°C, le rayonnement solaire à 1000 W/m² et la moitié de l'épaisseur de l'atmosphère terrestre à l'équateur. Ceci est comparable à une journée claire à midi à une latitude de 40°. Les modules peuvent être évalués à 100 Watts sous ces conditions avec une performance réelle à une marge de +/-5%. Le bassin méditerranéen et le Moyen-Orient connaissant souvent des journées à plus de 25°C, il est très probable qu'il y ait souvent une réduction de la production d'énergie, surtout en plein milieu de l'été. En plus, installés sur le toit ou une surface plane, les modules PV peuvent atteindre une température interne de 50 à 75°C, causant ainsi une perte de performance.

Il est par conséquent important de prendre en compte l'influence climatique sur les différents types de PV et les endroits où ils peuvent être installés. On peut profiter de la ventilation naturelle à travers un bon concept pour refroidir les panneaux PV à une température d'opération plus désirable. Ceci est particulièrement vrai pour les murs photovoltaïques. Le BIPV peut être conçu pour faire sortir l'air chaud par le haut des bâtiments, pour assurer un environnement plus froid pour les panneaux. Les modules à silicium amorphes seraient préférables pour les endroits chauds malgré leur efficacité faible, surtout que leur performance ne dépend pas de la température.

La température des cellules PV est dure à mesurer surtout qu'elles sont étroitement encapsulées pour les protéger de la dégradation environnementale. La température à l'arrière des modules PV est souvent mesurée et utilisée au lieu de la température de l'avant de la cellule en assumant qu'elles sont pareilles. D'un point de vue mathématique, la corrélation entre la température d'opération (T_c) des cellules est explicite en forme, donnant le T_c directement, ou implicite c.à.d. impliquant des variables

comme l'efficacité de la cellule ou les coefficients de transferts thermiques, qui elles-mêmes dépendent du T_c . Dans ce dernier cas de figure, un processus d'itération est nécessaire pour calculer la température de la cellule. On peut trouver plusieurs modèles pour évaluer cette température, tantôt explicites, tantôt implicites. L'une des équation les plus faciles et les plus répandues pour calculer T_c :

$$T_c = T_a + \frac{G_m}{800} (\text{NOTC} - 20) \quad (1)$$

T_c est la température de la cellule, T_a celle de l'air (en °C), G_m le rayonnement solaire (W/m^2), et NOTC est la température de service nominale des cellules. Une fois T_c est connu, la diminution peut être calculée par l'équation (2).

$$\frac{PVP_{T_c}}{PVP_M} = 1 - \text{PTC} \cdot (T_c - 25) \quad (2)$$

Où PV_{T_c} est la puissance du module PV à la température T_c , PV_M est sa puissance maximale (dans les conditions normales d'essai), et PTC le coefficient de température. Elle dépend du type de panneau. Les valeurs ci-contre font référence à un module polycristallin typique.

Les températures élevées peuvent également affecter la conversion DC/AC des onduleurs. Dans des régions chaudes, il est nécessaire de refroidir les onduleurs pour en améliorer l'efficacité. Pourtant, elle implique une consommation électrique qui devrait être soustraite de la production du système PV. Un autre facteur de réduction sont les dépôts de poussières qui peuvent empêcher le bon fonctionnement des panneaux. Dans quelques régions proches du désert, ça peut être un problème assez sérieux. Si l'on avait les informations, on les aurait incluses dans l'évaluation de la production potentielle.

Catalogne - Espagne

Puisque la Catalogne est située à une latitude entre 40,3° et 42,5° Nord, les panneaux PV orientés vers le sud avec une inclinaison de 41° sont la meilleure solution pour la production d'électricité. En hiver, une inclinaison plus conséquente améliorera légèrement la production. Pourtant, sachant que les 2/3 de l'énergie annuelle sont produites durant la période estivale (Avril-Septembre), il est recommandé d'employer une inclinaison proche de la latitude pour une production annuelle maximale. La figure 1 ci-dessous montre la différence entre le rayonnement solaire et les orientation/inclinaison des panneaux durant l'année en Catalogne. Les meilleures inclinaisons sont celles proches de 41°, alors que les inclinaisons horizontales et sud permettent une exposition optimale au soleil en été et en hiver.

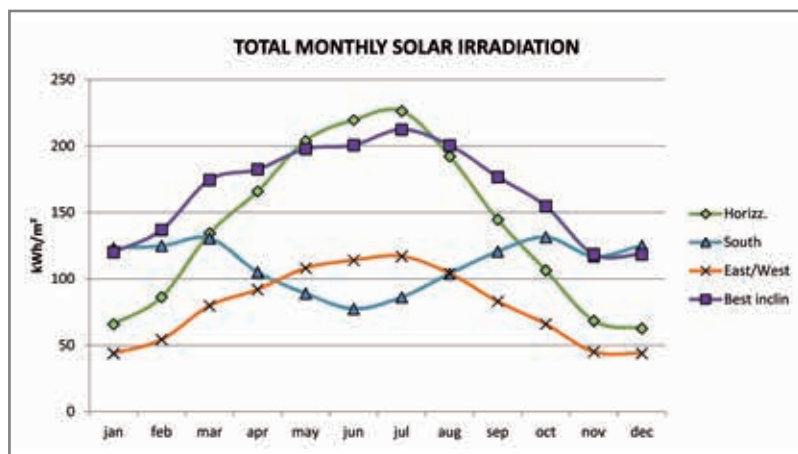


Fig 1 Rayonnement solaire par différentes orientations et inclinaisons.

La figure 2 montre le pourcentage de la réduction du rayonnement solaire avec différentes orientations et inclinaisons. Comme on peut le voir, les dispositifs PV sont flexibles en termes d'inclinaison et d'orientation sans changement dramatique dans la performance du système. Il est recommandé de réduire l'angle d'inclinaison des générateurs PV qui ne sont pas orientés vers le sud. Ainsi, une installation PV avec une inclinaison de 30° peut avoir une

performance de 90% même avec une déviation sud atteignant les 45° (est ou ouest). La meilleure inclinaison permet une meilleure exposition au rayonnement et également une bonne température de performance des panneaux solaires, comme le montre la figure 3, pourcentage de réduction de la production d'énergie causée par la température des cellules.

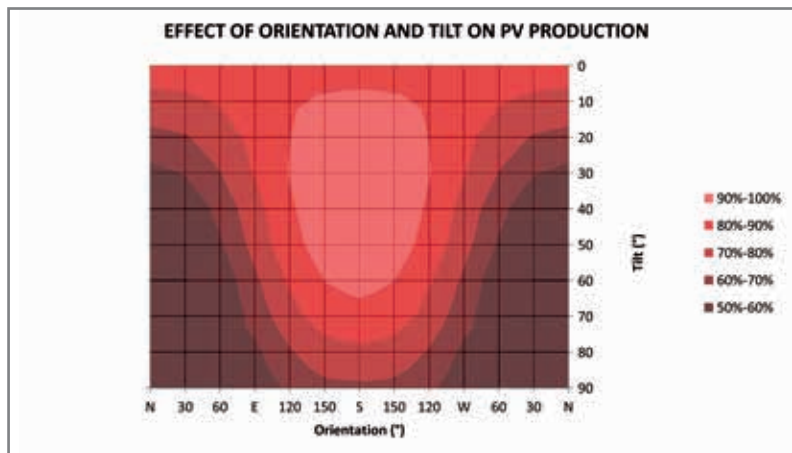


Fig 2 Pourcentage de la réduction de la production selon l'orientation et l'inclinaison.

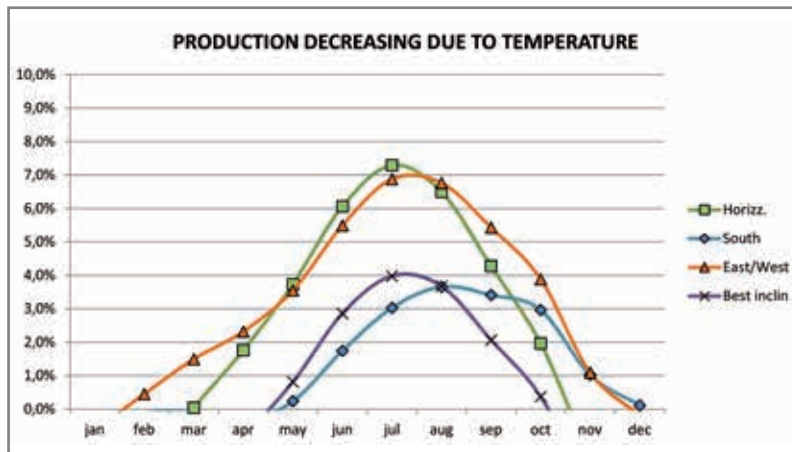


Fig 3 Pourcentage de la réduction de la production à cause de la température selon orientation et inclinaison.

Alexandrie - Égypte

Dans ce qui suit, vous trouverez les informations concernant le rayonnement solaire pour la région d'Alexandrie.

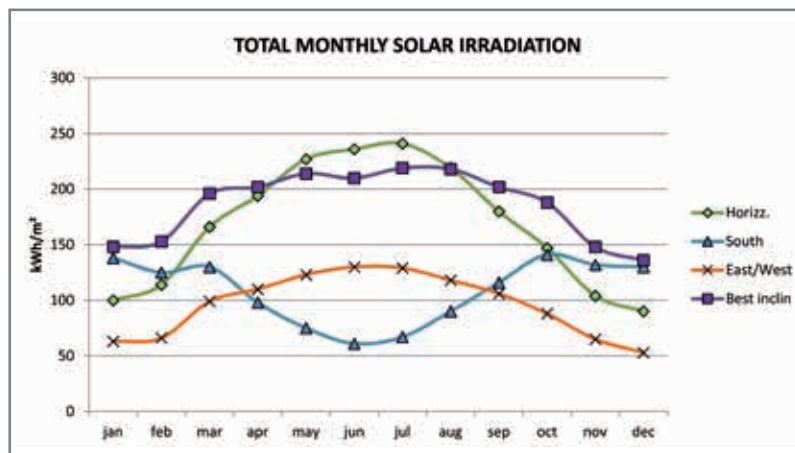


Fig 4 Rayonnement solaire total par orientation et inclinaison

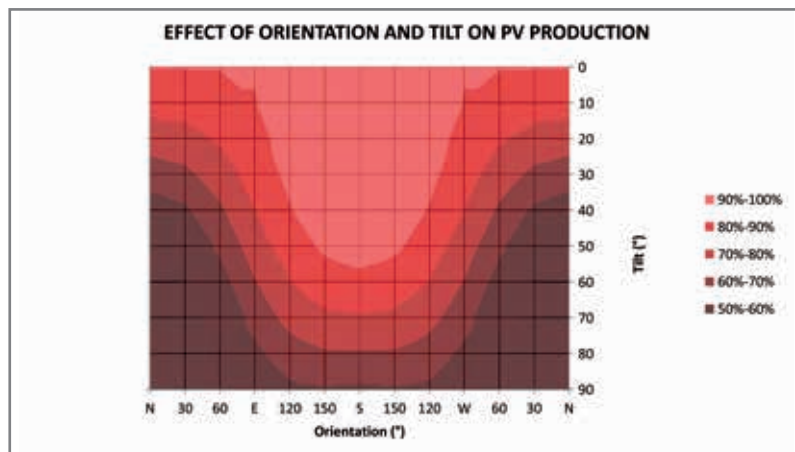


Fig 5 Pourcentage de la réduction de la production selon l'orientation et l'inclinaison.

Liban

Dans ce qui suit, vous trouverez les informations concernant le rayonnement solaire au Liban.

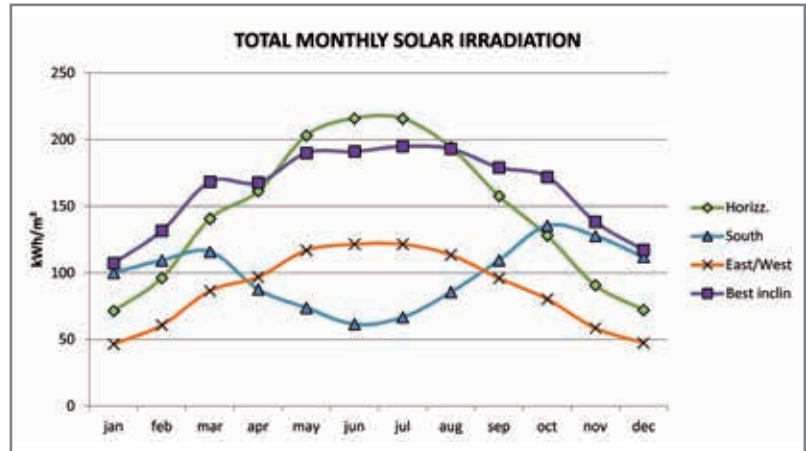


Fig 6 Rayonnement solaire total par orientation et inclinaison.

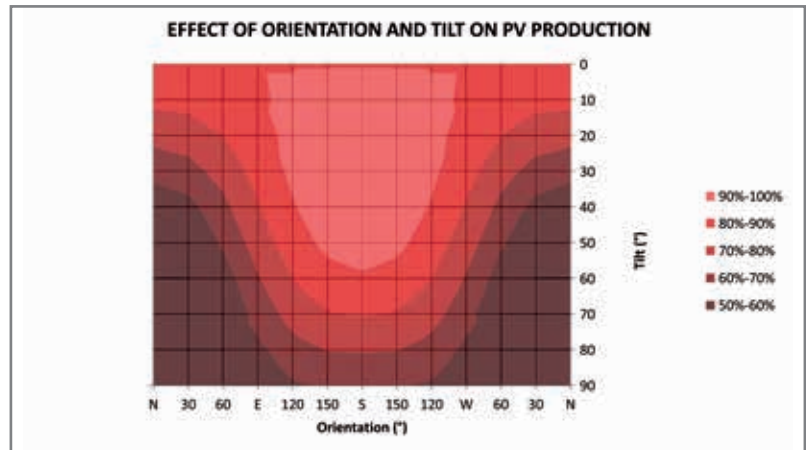


Fig 7 Pourcentage de la réduction de la production selon l'orientation et l'inclinaison.

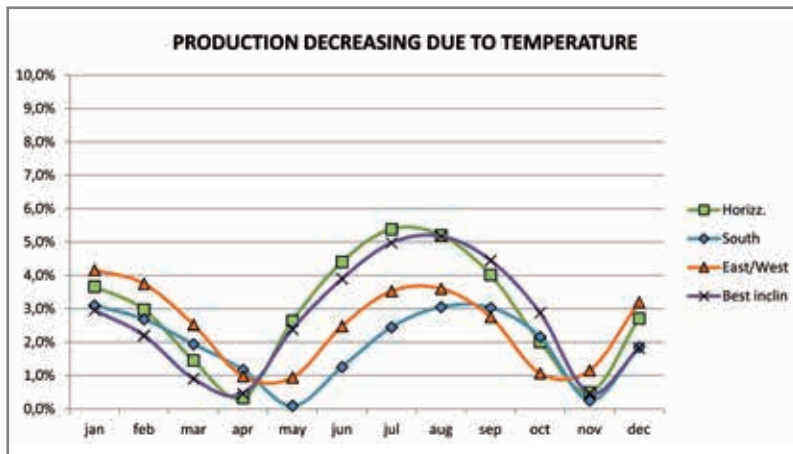
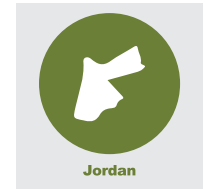


Fig 8 Pourcentage de la réduction de la production à cause de la température selon orientation et inclinaison.

Aqaba - Jordanie

Comme le montre la figure 9, le rayonnement annuel total à Aqaba peut atteindre les 2160 kWh/m² quand le PV est incliné à l'angle optimal. Le rayonnement mensuel maximum par m² (235 kWh/m²) a lieu en juin avec un système d'installation horizontal.



Le meilleur angle d'inclinaison donne un rayonnement stable toute l'année. Les niveaux les plus bas de rayonnement ont lieu quand les modules PV sont installés vers le sud, l'est ou l'ouest.

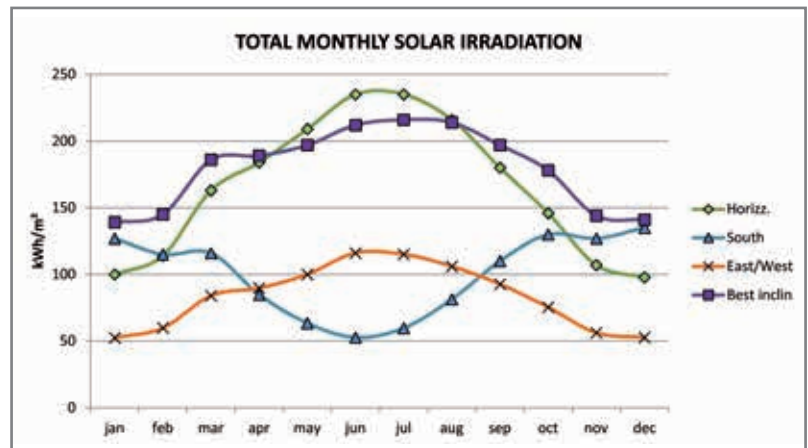


Fig 9 Rayonnement solaire total selon l'orientation et l'inclinaison.

Pour comprendre l'effet de l'orientation et de l'inclinaison sur la production énergétique de la figure 10, il est important de savoir qu'Aqaba se retrouve à une latitude 29.531°.

La figure 11 illustre l'augmentation ou la réduction de la production à cause de la température selon l'orientation et l'inclinaison.

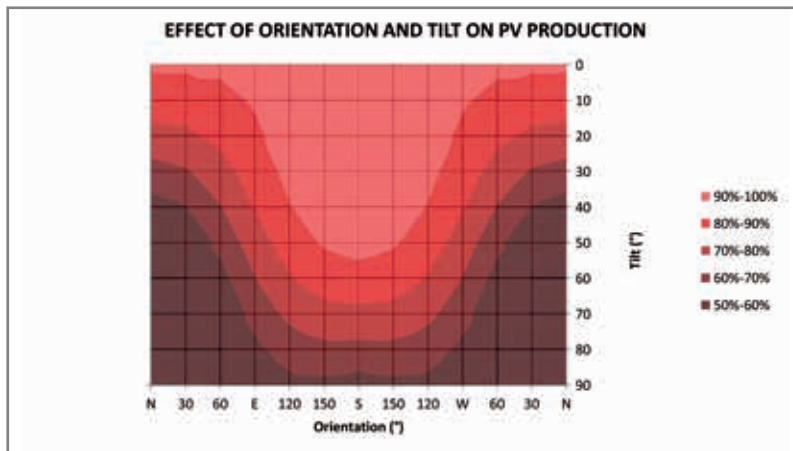


Fig 10 Pourcentage de la réduction de la production selon l'orientation et l'inclinaison

À Aqaba, la température des cellules PV (calculée selon la formule précitée) est proche de 25°C (conditions d'essai normales) en hiver (décembre, janvier et février). Il y a quelques cas où l'efficacité des cellules solaires a atteint sa production optimale pour une température de moins de 25°C (Irwanto, 2014).

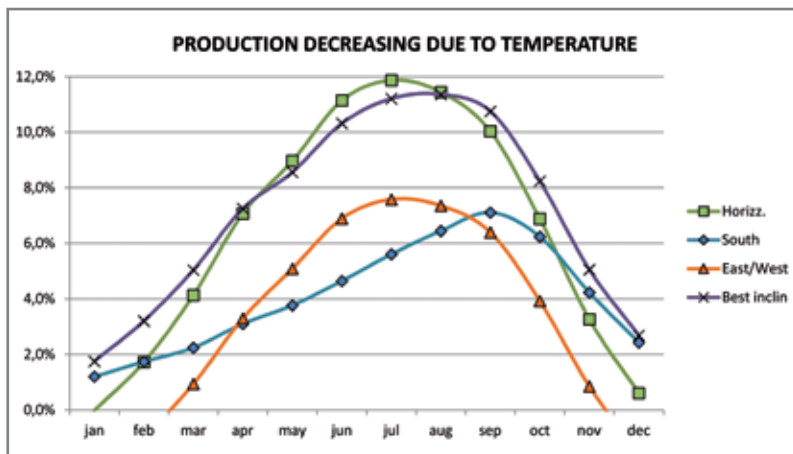


Fig 11 Pourcentage de la réduction de la production à cause de la température selon l'orientation et l'inclinaison

Tunis - Tunisie

Tunis se situant entre 36,5° et 37° N de latitude, les panneaux PV orientés vers le sud avec un angle d'inclinaison d'environ 30° est la meilleure option pour une production annuelle optimale d'électricité. En hiver, une inclinaison plus importante résulterait en une production meilleure.



Pourtant, sachant qu'environ 70% de l'énergie est produite durant la période estivale (mars à octobre), un angle d'inclinaison proche de la latitude est recommandé pour maximiser la production énergétique. Dans la figure 12, on peut voir les différences de rayonnement selon les différentes orientations et inclinaisons dans la région de Tunis.

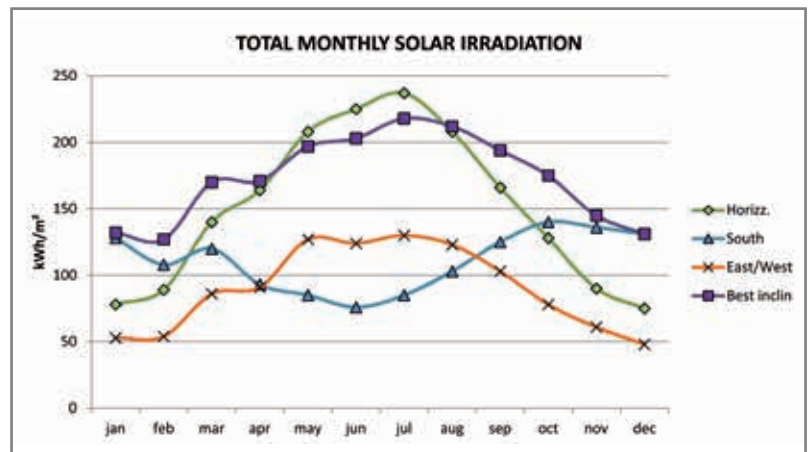


Fig 12 Rayonnement solaire total selon l'orientation et l'inclinaison

Dans le graphique qui suit (figure 13), on peut voir le pourcentage de réduction du rayonnement selon les différentes orientations et inclinaisons. Comme on peut le constater, l'installation des panneaux solaires peut être flexible en matière d'orientation et d'inclinaison sans réduire dramatiquement la performance du dispositif.

Il est recommandé de réduire l'angle d'inclinaison des modules PV qui n'ont pas la meilleure orientation (vers le sud).

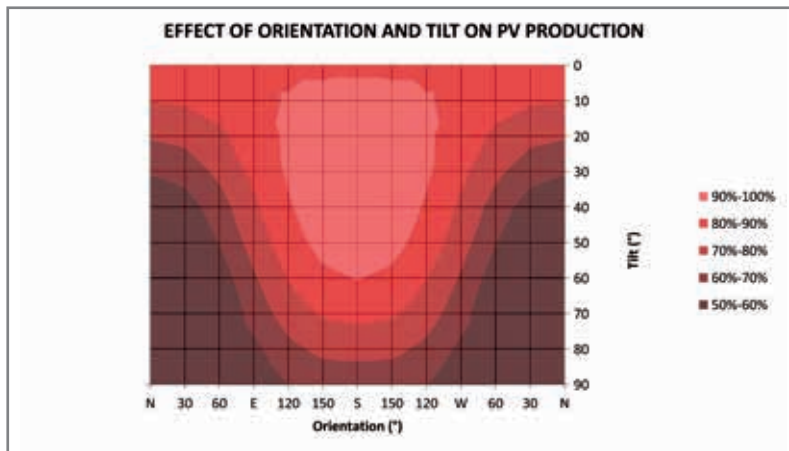


Fig 13 Pourcentage de la réduction de la production selon l'orientation et l'inclinaison

Sardaigne - Italie

Dans ce qui suit, vous trouverez les informations concernant le rayonnement solaire en Sardaigne.

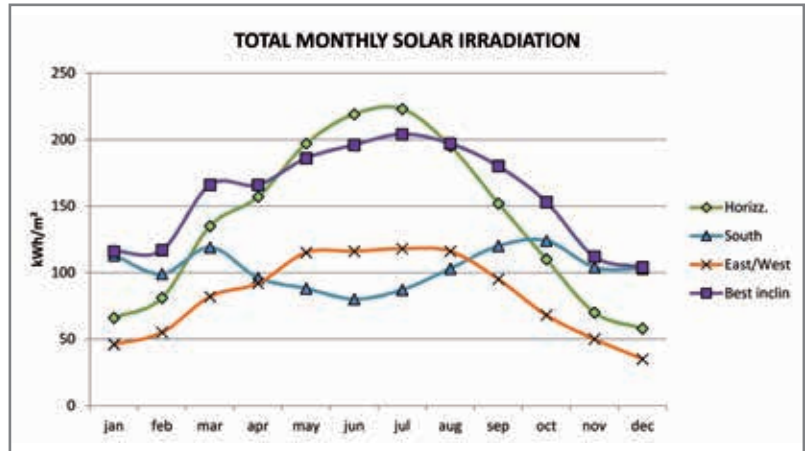


Fig 14 Rayonnement solaire total selon l'orientation et l'inclinaison

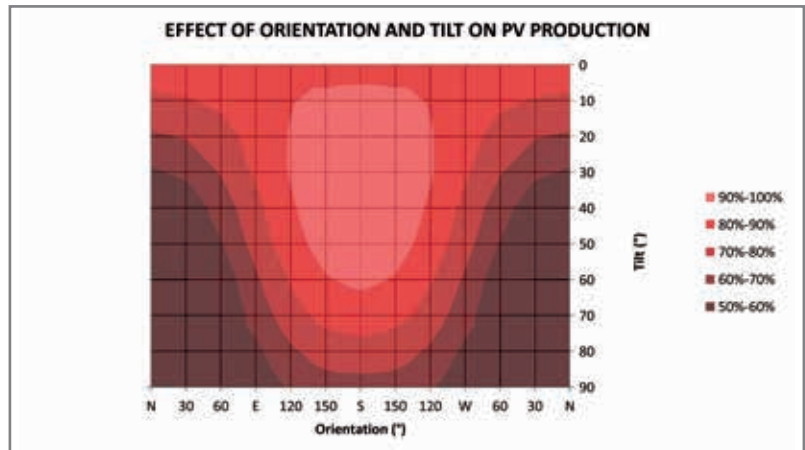


Fig 15 Pourcentage de la réduction de la production selon l'orientation et l'inclinaison

5.3 Dimensionnement d'une centrale BIPV

Les paramètres principaux sur lesquels se base le dimensionnement du système PV sont l'efficacité de la conversion dans des conditions normales d'essai (η_{stc}) et le kilowatt crête (kWp). Le premier désigne l'efficacité du module pV qui produit un courant dans des conditions standards qui sont:

- Le rayonnement solaire incident (G) sur le module à hauteur de 1000 W/m²;
- Une température de l'air de 25°C;
- Spectre solaire équivalent à 1,5 AM (Air Mass).

Les conditions d'essai sont généralement recrées en laboratoire pour ensuite mesurer la puissance électrique d'un module PV.

L'efficacité η_{stc} se calcule par (3):

$$\eta_{stc} = \frac{P_{max}}{G \cdot A_{mod}} \quad (3)$$

où:

- P_{max} est la puissance électrique du module (W);
- G est le rayonnement solaire incident sur le module (1000 W/m²)
- A_{mod} est la surface totale du module (m²).

kWp désigne la quantité de panneaux nécessaire pour produire 1 kW d'énergie sous des conditions standards (ce n'est pas une unité d'énergie ou de puissance). Pour quantifier le kWp, il est nécessaire de déterminer sa surface c.à.d. celle des panneaux nécessaire pour produire 1 kW dans ces conditions.

Selon (1):

$$A_{kWp} = \frac{P_{max}}{G \cdot \eta_{stc}} \quad (4)$$

Pour 1 kWp P_{max} est 1000 W, alors que sous les conditions standards G équivaut à 1000 W/m², ainsi (4) peut être écrite:

$$[m^2] = \frac{1}{\eta_{stc}} \quad (5)$$

Dans (5), les unités ne sont pas respectées. Ceci veut dire que dans une surface d'un m² avec 1 kWp de panneaux équivaut l'inverse du rapport de l'efficacité des conditions standards. Il est évident qu'utiliser plus de modules performants, la surface nécessaire pour assurer l'énergie sera moins importante.

Par exemple si $\eta_{stc}=10\%$; AkWp=10 m²
 $\eta_{stc}=12,5\%$; AkWp=8 m²
 $\eta_{stc}=5\%$; AkWp=20 m²

Il est ainsi possible d'estimer la production d'1 kWp.

L'électricité produite dépend du rayonnement solaire incident des panneaux et ainsi de sa situation géographique.

Pour la ville de Cagliari, pour une surface orientée vers le sud avec un angle de 30°, le rayonnement annuel est de ≈ 1800 kWh/m².

Intégrant (1) avec le temps, on peut l'écrire:

$$E_{DC} = I \cdot A_{kWp} \cdot \eta_{stc} \quad (6)$$

Où:

- EDC est le courant électrique continu produit durant un an par 1 kWp;
- I est la moyenne de rayonnement annuel (kWh/m²)
- AkWp est la surface qu'occupe 1 kWp; (m²)
- η_{stc} est l'efficacité sous conditions standards.

Suivant (5), (6) peut s'écrire:

$$E_{DC} [kWh] = I \left[\frac{kWh}{m^2} \right] \quad (7)$$

À nouveau, les unités ne sont pas respectées, mais mathématiquement la production annuelle de courant continu d'1kWp qui équivaut au rayonnement annuel d'une centrale PV d'1 m².

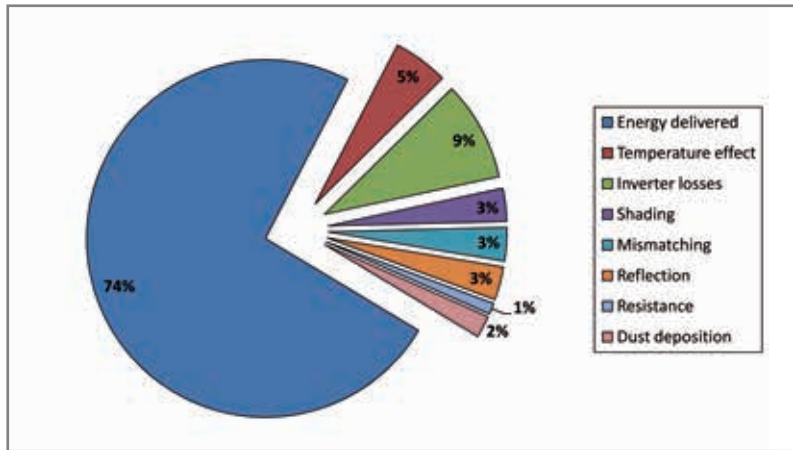


Fig 16 Moyenne d'efficacité BOS pour un système PV.

À Cagliari, on produit 1800 kWh/année, peu importe le genre de panneaux employés. Cette production n'est pourtant que théorique. D'abord, les panneaux fonctionnent rarement dans des conditions standards et en plus, l'électricité a besoin d'une conversion DC/AC pour être utilisée pour les appareils des bâtiments.

Un deuxième type d'efficacité est la Balance du Système (BOS) qui prend en compte les pertes qui ne le sont pas dans les conditions standards. Tous les facteurs qui contribuent à la BOS sont énumérés dans la fig. 16.

Il est important d'indiquer que la BOS du BIPV peut être réduite si l'installation n'est pas réalisée correctement. Par exemple, si le panneau ne peut pas dissiper l'excès de chaleur à travers la ventilation de la face inférieure, les pertes par effet de température peuvent dépasser les 5%.

L'énergie produite par le système et livrée au réseau du bâtiment serait:

$$E_{AC} = E_{DC} \cdot \eta_{BOS} \quad (8)$$

où EAC est la production énergétique de l'onduleur (courant alternatif) si le système est rattaché au réseau.

Il est possible de simuler différents scénarios à partir de différentes données.

5.3.1 Dimensionnement par destination d'emploi (résidentiel, commercial, bureaux, écoles...)

Il est généralement logique d'utiliser dans un bâtiment toute l'énergie que produit le PV.

La quantité d'énergie utilisable sur place dépend du rayon, de la magnitude et le schéma de la demande. Une grande partie des bâtiments (bureaux, hôtels, maisons, etc.) peuvent avoir recours au PV. Les bureaux ont un bon potentiel PV car ils ont une demande en électricité assez élevée toute l'année (surtout en été), particulièrement entre 9h et 17h. Ainsi, il serait bien d'égaliser la demande en énergie avec l'approvisionnement en PV. Par ailleurs, les maisons représentent plus un plus gros défi car la demande est plus intermittente et dépend largement de l'usage des habitants de ces habitations. Les systèmes connectés au réseau fonctionnent le mieux pour les habitations surtout que le réseau y opère en tant que dispositif de stockage. Les bâtiments commerciaux et industriels à toit large sont également une cible du PV. La consommation d'énergie variant entre les deux types de bâtiments, le PV doit être bien considérée dès la phase préliminaire de concept. Par exemple en Sardaigne, une famille utilise 3000 kWh d'électricité en moyenne. Pour répondre à leur besoin, on a besoin de,

$$ECA=3000 \text{ kWh}$$

$$ECC=ECA/\eta_{BOS}=3000/0,74=4054 \text{ kWh}$$

Puisqu'1 kWp produit en un an la même quantité d'énergie d'1 m² de panneaux solaires, le nombre kWp nécessaire pour couvrir ce besoin est:

$$N_{kWp}=4054/1800=2,25 \text{ kWp}$$

Si l'on considère qu'1 kWp coûte 2.500 €, l'investissement PV en coûtera 5.625 €. Il ne faut pas oublier que les informations sur le rayonnement solaire utilisent l'orientation et l'inclinaison optimale, mais elle peut ne pas toujours être la meilleure option d'intégration.

5.3.2 Dimensionnement par taille du bâtiment

Pour assurer la sécurité, il y a des mesures à prendre en installant un système PV sur un bâtiment nouveau ou existant. Pour les nouveaux, le concept de la structure doit prendre en considération la charge du dispositif PV, comme toute autre structure à installer.

Pour les bâtiments existants, on aurait besoin d'un ingénieur en structure pour procéder à une inspection de la structure du toit et pour calculer les charges structurelles.

Selon leur emplacement, les systèmes solaires PV sont exposés au risque de foudre. La foudre pouvant bien endommager les modules PV et les onduleurs, il faut assurer une bonne protection anti-foudre pour le système PV et la structure entière. Les onduleurs doivent être protégés par des parafoudres du côté DC. Il est judicieux d'installer également des parafoudres du côté AC. Les structures et les panneaux PV doivent être mis à terre correctement.

Le système BIPV peut dépendre des surfaces des bâtiments disponibles pour l'installation. Dans ce cas, il faut bien estimer la taille de la centrale.

Considérons que le toit a une inclinaison de 30° orientée vers le sud sur une surface de 15 m².

Il faut choisir une technologie spécifique surtout qu'il faut bien connaître η_{stc} . Considérant que $\eta_{stc}=10\%$, $A_{kWp}=1/0.1=10$ m². Ceci veut dire que chaque kWp occupe 10 m² de la surface du toit incliné.

La N_{kWp} maximale qui peut être installée est $15/10=1,5$. La production totale annuelle sera de:

$$ECA=N_{kWp} \cdot I \cdot \eta_{BOS}=1,5 \cdot 1800 \cdot 0,74=1.998 \text{ kWh}$$

Si on considère que le coût de chaque kWp est 2.500 €, l'investissement sera de 3.750 €.

6. Connexions électriques et éléments

Les systèmes PV étaient divisés en deux catégories:

- Connectés au réseau
- Indépendants

Les systèmes PV connectés au réseau le sont toujours à un réseau public à travers un onduleur approprié car seuls les panneaux PV ou un groupe de panneaux produisent un courant continu. Tout comme les panneaux solaires, les éléments qui constituent le système PV connecté au réseau par comparaison aux systèmes PV indépendants sont :

- Les onduleurs: sont un élément important de tout système connecté au réseau. Il reçoit un maximum de courant continu des groupes PV et les convertit en courant alternatif au bon voltage et à la bonne fréquence pour alimenter le réseau ou supporter les charges domestiques. Il est important de choisir la meilleure qualité pour le budget disponible. En achetant un onduleur connecté au réseau, il faut faire attention à sa puissance (le voltage maximum et minimum de l'onduleur) et l'efficacité de la conversion énergétique. Les concepteurs doivent choisir des onduleurs conformes aux standards et régulations nationales.
- Compteur de courant: ou compteur de Kilowatt heure (kWh) est utilisé pour enregistrer le courant allant de et jusqu'au réseau. Des compteurs kWh jumeaux peuvent être employés; un pour indiquer l'énergie électrique consommée et l'autre pour mesurer l'électricité solaire envoyée au réseau. Un seul compteur kWh à bidirectionnel peut être utilisé pour indiquer la quantité nette d'électricité prise du réseau.
- Les systèmes doivent être équipés par des éléments de sécurités conformes aux standards et régulations nationales.
- Le réseau électrique : Finalement, le système PV doit être connecté au réseau car sans ce dernier, on ne pourrait pas le qualifier de dispositif PV connecté au réseau et ne produira pas d'électricité.

Un système connecté au réseau sans batteries est le moyen le plus simple et le moins coûteux pour installer une centrale solaire, sans devoir

charger et entretenir les batteries. Le bâtiment devient moins dépendant des différentes centrales électriques et satisfait ses propres besoins énergétiques. L'équilibre entre la production d'énergie solaire et la consommation d'électricité ménagère est assuré grâce au réseau. La surproduction en pleine journée est transférée au réseau et les besoins sont puisés le soir du réseau électrique, qui agit comme aire de stockage virtuelle.

Les systèmes indépendants n'ont pas de connexion externe mais répondent (parfois avec d'autres générateurs électriques) à tous les besoins énergétiques. Dans ce cas, la surproduction ne pouvant pas être perdue en pleine journée, le système est mis en place avec un système de stockage d'électricité, notamment une batterie.

De nos jours, cette classification est obsolète et le future des technologies PV implique toujours le stockage local même si le dispositif est connecté au réseau.

Les solutions de stockage ouvrent la porte à plusieurs nouvelles applications dont:

- La surtension des lignes à cause de l'usage de plusieurs onduleurs sur le réseau;
- Les périodes de coupure du courant peuvent être comblées surtout quand le bâtiment peut opérer en mode indépendant.

D'autres cas de figure peuvent être identifiés. Les bâtiments qui stockent l'énergie qu'ils produisent peuvent se permettre de demander à leur fournisseur d'électricité de couper le courant en période de demande de pointe. En retour, ils peuvent recevoir un escompte ou un paiement. En plus, il existe une nouveauté qui sont les applications intelligentes de réseaux. Un bâtiment peut opérer avec le réseau et faire des échanges avec les marchés d'énergie. Une réduction de la demande peut être établie plus rigoureusement que dans le cas d'un système sans stockage. Un bâtiment peut même vendre l'énergie sur le marché à des moments judicieux. La nécessité du stockage local est évidente dans les pays où le réseau électrique ne souffre pas de coupure ou de pénurie (comme l'Italie et l'Espagne, membres partenaires du projet FOSTER in MED). La

réduction des incitations dans les quelques dernières années a rendu moins pratique l'échange d'électricité sur réseau, surtout qu'on ne peut plus subsidier la surproduction.

Ainsi même dans ces cas, il serait bien de stocker l'énergie produite durant la journée pour la consommation tard le soir ou pour le lendemain. Traditionnellement, le stockage pour les panneaux PV est conçu pour les applications indépendantes. Ceci veut dire qu'une quantité d'énergie est stockée pour combler le déficit de production de plusieurs jours nuageux.

Les applications futures offriront l'option de stockage à petite échelle pour accumuler l'énergie solaire d'un jour pour une consommation plus tard dans la journée ou le lendemain. Si le bâtiment est connecté au réseau, un système de stockage d'énergie n'est pas nécessaire avec une longue période de faible production d'énergie solaire puisque le réseau agira comme réserve. Ainsi, les critères de dimensionnement peuvent être complètement différents que les systèmes indépendants.

Intégrer le stockage à un système connecté au réseau requiert plus d'éléments.

Un système PV à stockage est simplement le même qu'un système connecté au réseau avec des batteries (ou autre technologie) et un contrôleur de charge. Le contrôleur de charge détermine si l'énergie produite par les panneaux solaires est nécessaire pour l'usage ménager, pour les appareils à basse tension, l'éclairage ou si elle doit recharger les batteries à utiliser ultérieurement.

Le courant continu sortant du contrôleur passe par le convertisseur de DC à AC, se transformant en électricité utilisable pour appareils ménagers. Tout surplus d'électricité non consommé ou non utilisé par l'immeuble peut être envoyé aux sociétés d'électricité en charge du réseau. Il vaudrait mieux employer un éclairage et des appareils à courant continu sur votre système solaire avant qu'il ne soit transformé en AC par l'onduleur résultant en plus d'efficacité.

06

Les bonnes pratiques





Les bonnes pratiques citées ci-dessous ont été choisies parmi une large sélection de bâtiments à travers le monde. Ces bâtiments incluent des musées, des centres d'expositions, des centres commerciaux, des hôpitaux, des installations urbaines, et des édifices résidentiels privés. Ils ne sont pas censés être considérés comme la meilleure solution esthétique ou fonctionnelle mais on s'attend à les voir comme exemples d'application de systèmes PV dans plusieurs contextes géographiques, climatiques et culturels.

Dans ces exemples, le PV peut servir de toiture, de façade, pour la protection solaire ou comme une œuvre d'art, transparent ou opaque, prouvant encore une fois que cette technologie est prête à être utilisée de manière très flexible.

Centre éducatif Sheik Zayad au Zoo Al Aïn

Emplacement: Al Aïn - Abou Dhabi

Usage: Public (centre éducatif)

Projet: iC consulenten Ziviltechniker GesmbH

Puissance: 150 kwp



Fig 1 Centre éducatif en plein désert, Al Aïn - Abou Dhabi



Fig 2 Centre éducatif en plein désert, Al Aïn - Abou Dhabi

Pour répondre aux standards de développement durables imposés par l'Abu Dhabi Urban Planning Council (UPC), le CENTRE D'APPRENTISSAGE SHEIK ZAYAD est le premier bâtiment gouvernemental à atteindre le plus haut niveau de durabilité.

Le concept du projet a rassemblé une équipe interdisciplinaire d'architectes, de paysagistes, d'ingénieurs structurels, électriques et mécaniques, construction, des concepteurs experts en musées, et des consultants de durabilité pour travailler ensemble afin d'assurer le plus haut niveau de performance. Ce procédé s'inscrit dans le cadre d'une solution unique et intégrée de durabilité.

Le bâtiment est énergétiquement autosuffisant à cause de la combinaison des meilleures solutions d'éclairage et de ventilation parmi lesquelles:

- L'orientation et le poids du bâtiment: La position et la forme perforée de la cour intérieure des bâtiments favorisent le flux d'air à travers la cour.
- La terre comme isolation: Une grande partie du bâtiment est sous terre, réduisant la différence de température à l'intérieur et à l'extérieur.
- La lumière du jour: Le bâtiment est orienté de façon à maximiser la pénétration de la lumière du jour à l'intérieur du bâtiment. Des ouvertures profilées et des lucarnes indirectes offrent un éclairage de qualité tout en évitant le réchauffement à cause du soleil. Des petits volets permettent la pénétration de la lumière tout en limitant la transmission de chaleur.
- Protection solaire: Des surplombs en porte-à-faux assure l'ombre à l'entrée principale du bâtiment. Des systèmes de protection solaire rétractables en tissu sont utilisés pour couvrir les espaces et la cour à l'extérieur.

Dispositifs PV: Des collecteurs photovoltaïques recouvrent le toit du bâtiment avec une puissance de 150 kW. Le bâtiment produit ainsi 95% de ses besoins énergétiques.

Centrale PV de l'hôpital Meier, Florence

Location: Florence, Italie

Emplacement: Hôpital

Architecte: CSPA Firenze, arch. Paolo Felli

Coopération: les architectes Antonella Trombadore, Giuseppina Alcamo, Paola Gallo, Lucia Ceccherini, et l'ingénieur Silvia Murgia

Consultant en énergie: MSA

Power: 30 kwp



Fig 3 L'hôpital Meier, Florence, Italie

La serre photovoltaïque de l'hôpital Meier est une structure orientée au sud avec libre accès au soleil de façon à maximiser la production d'énergie en hiver; cette structure n'est non seulement particulière mais surtout un espace unique. Le concept n'a pas seulement pris en compte les aspects énergétique et environnemental mais également l'impact social en créant un espace agréable pour la communauté qui peut l'utiliser toute l'année pour des activités à l'extérieur sans devoir puiser davantage d'énergie. Il s'agit d'un espace intégré à un parc vert adjacent. L'in-

stallation PV intégrée aux façades du bâtiment permet de combiner la production d'énergie et autres fonctions de l'enveloppe de la structure, comme la protection solaire, contre les intempéries et la chaleur. Des économies d'énergie sont possibles et importantes avec ces fonctions combinées comme l'exemple des systèmes de façades assez coûteux où le coût du revêtement équivaut à celui du PV. En plus, on n'a pas besoin de terrain coûteux ni d'une structure de soutien séparée. L'électricité est générée au point d'usage. Ceci évite les pertes de transmission et de distribution tout en réduisant les coûts opérationnels et d'entretien pour l'entreprise de services d'utilité publique. Il s'agit d'un système PV à 30 kWp avec des modules photovoltaïques verre sur verre.

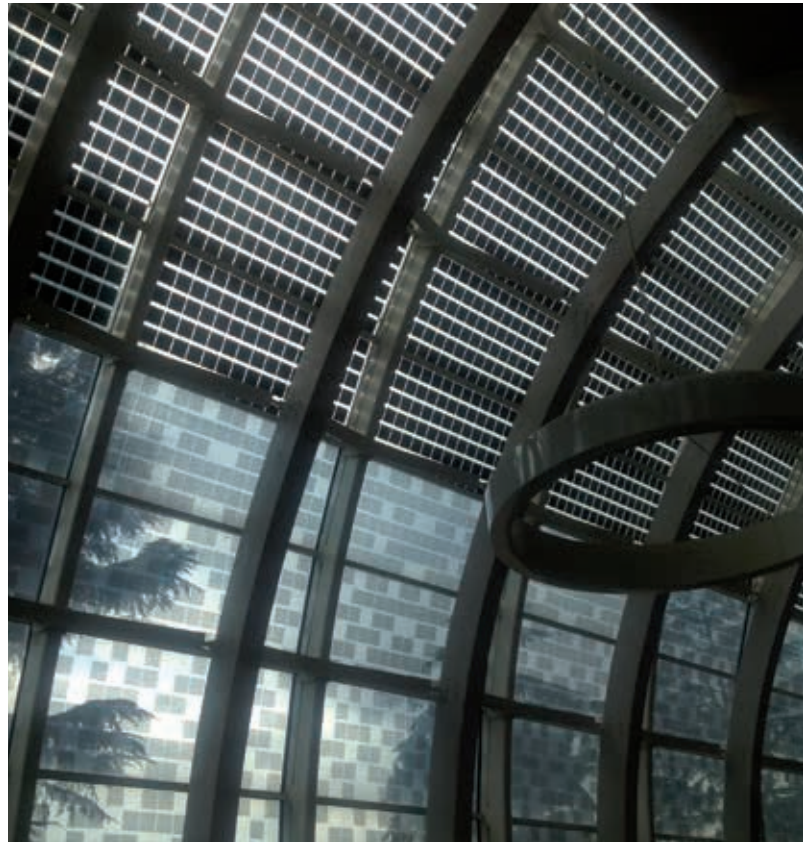


Fig 4 L'hôpital Meier, Florence, Italie

Cité du Design à St. Étienne

Emplacement: Saint Étienne, France

Usage: Multifonctionnel

Architecte: LIN Architects - Berlin

Puissance: 25 kwp

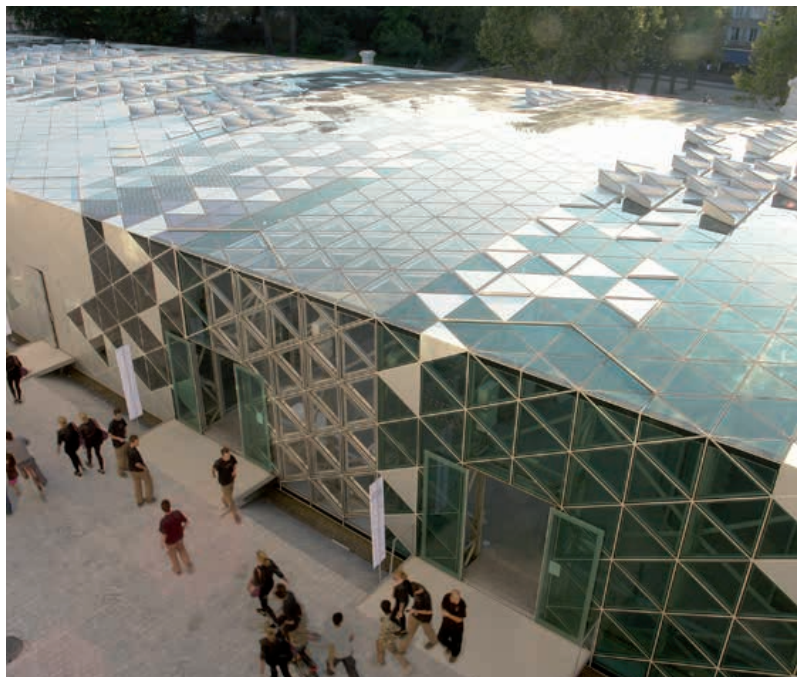


Fig 5 Cité du Design, Entrée

Conçue en 2009 par le bureau LIN siégeant à Berlin et à Paris, la Cité du Design contient des auditoriums, des salles de réunion, un espace d'exhibition, une médiathèque, des jardins intérieurs avec une tour d'observation autour du hall. Une structure 3D forme les murs et le toit de ce complexe, et l'intérieur du hall est ouvert sans poutres de support. Le centre est efficace énergétiquement et utilise l'échange de chaleur et un système de récupération pour réduire le besoin d'énergie pour le chauffage. De l'air pré-conditionné des jardins intérieurs, sans être chauffé,

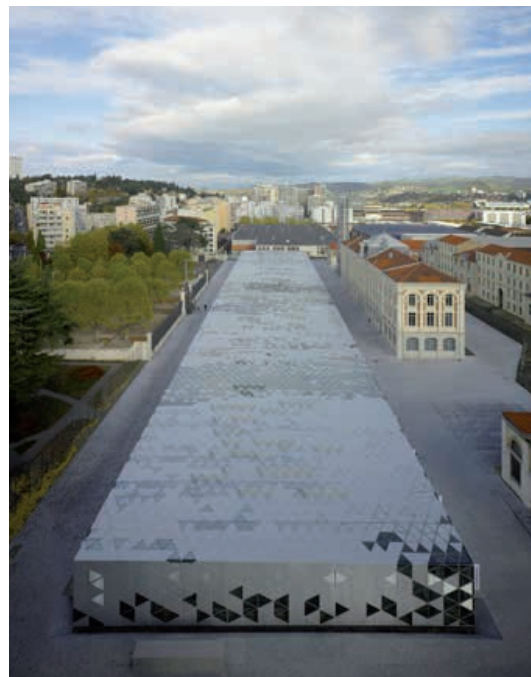


Fig 6 Cité du Design, vue aérienne de la Platine

est projeté dans le système pour chauffer les salles voisines. L'enveloppe de Platine est faite de 14,000 équilatéraux d'1,2 m de côté et une surface réactive avec modulation entre opaque et transparent, isolé et interclimatique, ouvert et fermé, tout en accompagnant les différents cycles et interactions de la Cité du Design. Le choix du vitrage permet la distribution de la lumière naturelle selon l'usage des locaux.



Fig 7 Cité du Design, Saint Étienne

Les qualités thermiques des panneaux assurent une qualité climatique de l'enveloppe modulable selon les critères locaux. La possibilité d'intégration des panneaux solaires (PV et expérimental) à la surface de la Platine permet une production d'énergie solaire et le développement de matériaux à énergie solaire innovateurs. L'enveloppe réagit aux changements et peut également avoir plusieurs fonctions. À long terme, les panneaux peuvent être remplacés ou modifiés pour s'adapter aux besoins changeants ou pour permettre davantage d'expérimentation.

Le Centre de Mon

Emplacement: Perpignan, France

Usage: Centre multifonctionnel (station de bus, gare, centre commercial, bureaux, hôtels)

Projet: L35 Arquitectos

Puissance: 232 kwp

L'extension de la nouvelle gare de Perpignan qui inclut un complexe multifonctionnel (station de bus, centre commercial, bureaux, et deux hôtels), est un élément autour duquel tourne le plan urbain municipal pour revitaliser le quartier Saint Assisclé et convertir la gare en une centre intermodal de développement urbain et le nouveau moteur économique de la ville.



Fig 8 Le Centre de Mon, Perpignan, France

Le projet longe l'axe parallèle créant un sentier public entre deux séries de bâtiments, l'un proche du rail et l'autre en face du boulevard de la ville.

Les façades portent une enveloppe ventilée de verre changeant du rouge sombre à l'orange, du vert et bleu au jaune, créant un effet dynamique tout au long du bâtiment de 400 m. Ici, des modules PV semi-transparents, montés sur une barre ondulée en métal, sont utilisés pour couvrir le passage entre les deux bâtiment, permettant à la lumière d'illuminer l'atrium et en même temps le protéger de la pluie.

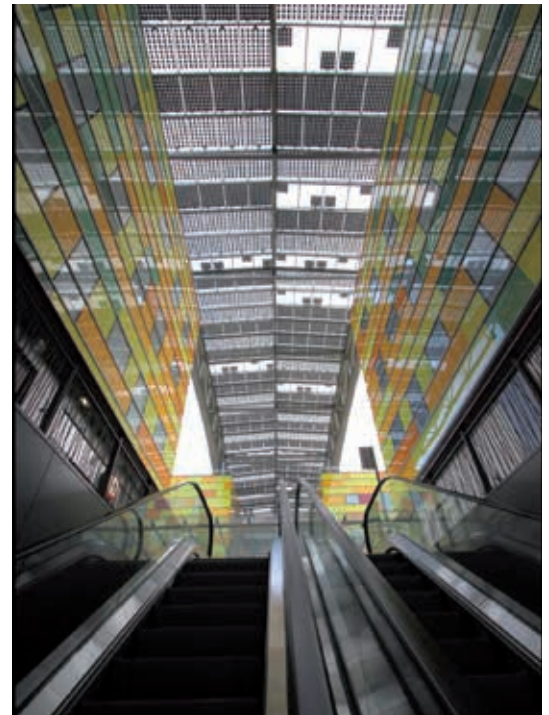


Fig 9, 10 Le Centre de Mon, Perpignan, France

La Maison de la Musique

Location: Aalborg (Danemark)

Usage: Salle de concert

Projet: COOP HIMMELB(L)AU

Conçu par l'entreprise autrichienne Coop Himmelb(l)au, ce centre multifonctionnel est un chef-d'œuvre en matière de design d'énergie solaire passive et comprend une façade sud enveloppée de PV à couche fine pour réduire sa consommation d'énergie. Avec une salle de concert de 1300 places, des auditoriums, des cours publiques et des éléments durables, le Danemark a de quoi rajouter à la scène culturelle. Pour assurer une utilisation optimale de l'ombre et de la lumière, des modules triangulaires (au lieu des modules rectangulaires) ont été conçus et assemblés à partir de panneaux métalliques triangulaires avec une position non pliée sur la façade. Les modules de 2,3x2,3 m sont recouvertes de cellules semi-transparentes qui résulte, sur-



Fig 11 La Maison de la Musique, Aalborg, Danemark

tout le soir, en une production assez bien intéressante. En plus, des éléments en verre sont placés diagonalement et opèrent comme un coupe vent, qui à son tour permet d'ouvrir des fenêtres même dans les bâtiments les plus élevés. À part ces fonctions, on doit dire que cette façade produit 70 kWh par m² annuellement.

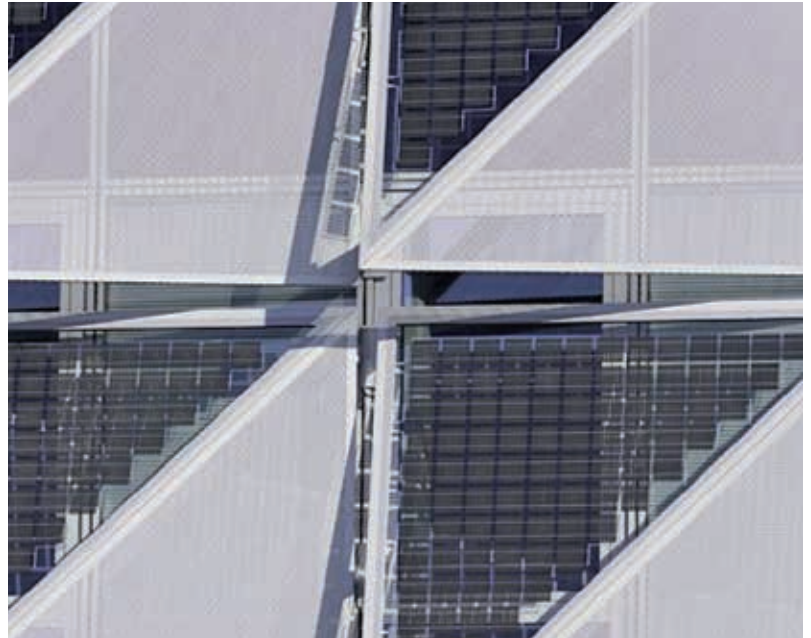


Fig 12, 13, 14 La Maison de la Musique, Aalborg, Danemark

Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya (MNACTEC)

Emplacement: Terrassa, Catalunya

Usage: Musée

Entrepreneurs:

Museu Nacional de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya, ES

Laboratoire Analyse et Architecture des Systèmes du CNRS, FR

Teulades i Façanes Multifuncionals SA (TFM), ES

BP Solarex, UK

Puissance: 38,7 kwp

Le musée a opté pour une façade colorée comme revêtement technologique et architectural du mur le séparant d'un immeuble résidentiel adjacent au centre. Le mur est recouvert d'une structure métallique sur lesquels 527 modules PV sont connectés au réseau.



Fig 15 Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya (mNACTEC), Terrassa

La façade PV colorée est montée sur une structure qui rappelle le mur-rideau, opérant comme un système de production d'électricité et qui évite au mur de séparation de se refroidir rapidement en hiver et de surchauffer en été. Les modules sont de 2 types : des cellules monocristallines bleues standards à haute performance et des cellules monocristallines translucides magenta et dorées qui permettent un rayonnement solaire de plus de 10%.

Bien que les modules bleus aient une efficacité de conversion électrique plus importante que les deux autres couleurs, ces modules ont été choisis en priorité à cause du critère esthétique plutôt que pour leur côté pratique, car cette façade se situe sur Rambla d'Egara, l'une des rues les plus fréquentées de Terrassa. L'installation PV a une puissance de 39.7 kWp et occupe une surface de 300 m². Elle produit 40,000 kWh annuellement ce qui couvre 15% des besoins électriques du musée. Le dispositif est devenu une figure emblématique pour le musée et pour la ville de Terrassa.



Fig 16 Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya (mNACTEC), Terrassa

Le Pavillon Renzo Piano aux Musée des Arts Kimbell

Emplacement: Fort Worth, Texas

Usage: Musée

Projet: Renzo Piano Building Workshop and Arup

Entrepreneur PV: GIG Fassaden, USA

Modules: 2.403 VSG 2/4

Dimensions: 2.230 x 180 mm

Puissance: 120 kWp

Le pavillon rabaissé de Piano bordé de colonnades avec un avant-toit complimente le bâtiment du musée Kahn. L'attention est donnée à la lumière naturelle et le béton est le matériau principal de construction. Le pavillon est composé de deux sections connectées par une passerelle en verre. La section avant, plus à l'est, donne une impression de légèreté: un système de toiture en verre semble flotter au-dessus des poutres en bois et des poteaux en béton. Des colonnes carrées en béton encadrent l'entrée centrale ornée de verre et font le tour de 3 côtés du bâtiment.



Fig 17 Nouveau pavillon du musée Kimbell, États-Unis, toit.

La façade tripartite anime l'intérieur avec une entrée spacieuse et des galeries au nord et au sud. Cachée sous un toit vert, la section ouest du pavillon Piano contient une galerie d'œuvres d'art sensibles à la lumière, 3 studios éducatifs, une grande bibliothèque et un auditorium pour la musique. Ce dernier est sous-terrain et est la pièce maitresse du concept. Des sièges inclinés font face à la scène avec un contexte animé par les fluctuations de la lumière naturelle.

Le toit est une couche unique multifonctionnelle. On y retrouve un système PV à volets. Sa fonction principale est de contrôler la quantité de lumière qui pénètre l'espace; il peut être ouvert ou fermé, à un angle de 0 à 45 degrés. En cas d'intempéries, comme la grêle, les volets tournent et recouvrent la toiture en verre pour la protéger. Les cellules PV des volets génèrent assez d'énergie pour couvrir 70% des besoins énergétiques du bâtiment. Les volets protègent également le verre du soleil et chaque module est contrôlé par un système spécifique.



Fig 18, 19 Nouveau pavillon du musée Kimbell, États-Unis, toit.

Klimahaus Bremerhaven

Emplacement: Bremerhaven, Allemagne

Use: Centre ludo-éducatif

Projet: Klumpp Architekten, Bremen, Transsolar Energietechnik GmbH

Modules: 143 VSG-ISO 66,2(14)66,2

avec des dimensions Digiprint 1.180 x 1.700 mm

Puissance 35,7 kWp

Le concept architectural de ce centre ludo-éducatif consiste en une enveloppe en verre qui recouvre la structure interne de béton. Le concept "maison dans maison" est appliqué à environ 15000m² de la surface d'exposition. Dans la zone "Reise", le visiteur peut vivre une expérience réelle du climat de plusieurs régions du monde. Jusqu'à présent, 5000m² de la surface d'exposition est conditionnée pour reproduire des sensations de climat extrême variant du climat arctique, modéré, tropical et même désertique.



Fig 20 Klimahaus Bremerhaven, Allemagne

Le concept climatique des autres espaces d'exposition comme les "éléments", la "perspective" et le foyer sont conformes aux besoins du bâtiment et de ses nombreux visiteurs. Hormis les éléments PV intégrés aux façades, on n'emploie pour ces espaces que des sources d'énergie naturelles pour le refroidissement et la ventilation.

Le climat choisi et les concepts énergétiques correspondent aux objectifs du projet qui vise à promouvoir une attitude responsable envers l'environnement.



Fig 21, 22 Klimahaus Bremerhaven, Allemagne

Stadtwerke Konstanz Energy Cube

Emplacement: Constance, Allemagne

Usage: Centre de service clientèle Stadtwerke Konstanz

Projet: Façade / toit

Modules: 17 VSG-ISO

Dimensions max. 2.988 x 3.911 mm

Power 24,54 kWp

L'Energy Cube a une surface d'environ 800m², tous étages compris. La structure repose sur 47 piliers enfoncés 18m dans le sol. La façade est transparente et est faite de 80 éléments larges d'une surface totale de 1000m². Des surfaces individuelles de la façade peuvent être illuminées aux couleurs de l'entreprise Stadtwerke. Ainsi, le nouveau centre de service clientèle est efficace énergétiquement et emploie des sources d'énergie renouvelable.



Fig 23 Stadtwerke Konstanz Energy Cube, Allemagne

Le nouveau bâtiment produira plus d'énergie qu'il n'en consommera. L'énergie du soleil et de la terre seront utilisées pour l'électricité, le chauffage et la climatisation. Un système de pompage assure, selon le besoin, le chauffage ou la climatisation du sol. Selon le toit et la façade orientée au sud, une installation PV produit de l'électricité. Les données qu'on peut retirer des systèmes PV intégrées aux façades sont aussi intéressantes. Quand la longueur de l'extrémité horizontale est divisée par 5 et par 4 pour les extrémités verticales, on peut avoir des panneaux solaires d'une dimension maximale de 2,988 x 3,911 dont chacun produit une puissance maximale 1,246 kWp, un record pour le PV. Le poids du panneau est impressionnant et surpasse tous les autres. Du verre triple vitré avec des couches de 64mm donnera un panneau de 1,014kg. La combinaison des installations engendre une puissance de 23,2 kWp avec en plus, grâce aux cellules semi-transparentes, une transparence d'environ 22%. Les visiteurs du centre de service clientèle pourront en seulement quelques semaines admirer l'architecture et l'aspect énergétique de cette façade de référence.



Fig 24 Stadtwerke Konstanz Energy Cube, Allemagne

Maison sur la colline à Passail (Autriche)

Emplacement: Passail, Autriche

Usage: Résidentiel

Projet: Cabinet d'architecture Kaltenegger, Passail, Autriche

Entrepeneur PV: Möstl plant, Passail, Autriche

Modules: 20 VSG 8/10

Dimensions: 1.555 x 2.000 mm

Puissance: 4,7 kWp

Ce bâtiment résidentiel hors du commun se situe en haut d'une colline proche de Passail, Autriche. Sa base repose sur 6 colonnes, lui donnant l'air de flotter. L'emplacement, avec une vue pittoresque de la vallée, définissent le concept d'espace. Ainsi, l'architecte a rajouté une terrasse enveloppante l'ouvrant avec une façade en verre sur la face sud-ouest de la vallée.



Fig 25 Maison sur la colline à Passail, Autriche

L'espace inclut une salle de séjour et une salle à manger spacieuses, deux chambres à coucher, toutes les pièces sanitaires et techniques nécessaires en plus de deux espaces de stationnement.

Bien que le bâtiment ait une grande surface à ciel ouvert, il est conforme aux normes «maison passive».

Le parapet de la terrasse du côté de la vallée n'existe pas seulement pour des raisons de sécurité mais produit également de l'électricité avec des éléments PV (19 modules laminés en verre) générant 4,65 kWp. Pour installer les modules, les supports ont été insérés à l'arrière du verre et ne sont pas visibles à l'avant. Les boîtes de jonction et tous les câbles sont cachés dans le sol de la terrasse.

B.O.C. - Bonnheshof Office Centre

Emplacement: Düsseldorf, Allemagne

Usage: Bureaux

Projet: RKW Rhode Kellermann Wawrowski Architecture

+ Urbanisme, Düsseldorf

Photovoltaïque: bauwerk integrated photovoltaic

BIPV Schüco monocristalline

Modules: 114 VSG 6/6 dark grey

Dimensions: 1.300 x 3.300 mm

Puissance: 63,3 kWp



Fig 26, 27 B.O.C. - Bureau Bonnheshof

Le complexe Bonneshof – BOC moderne de bureaux à Düsseldorf est une extension du bâtiment existant, le Tersteegen Office Center - TOC, d'environ 12000 m² créant ainsi un nouveau lobby à deux étages. Ce centre de 5 étages avec un penthouse et un parking sous-terrain a été mis en œuvre selon les plans de Quantum Immobilien AG en tant qu'entrepreneur général, qui a complété le projet en 2014. Le concept de la façade se base sur une construction spéciale d'une double façade avec des panneaux sur la couche extérieure. Les éléments de la façade se basent sur des versions spéciales du Schüco.

Un système aluminium AWS 75 avec une isolation thermique développée et des systèmes à blocs profilés. La U-value totale de la façade est de 1,3 W/m²K alors que celle du verre est de 1,0 W/m²K. Le bâtiment principal se caractérise par l'alternation entre la façade de verre et les panneaux en rideaux. Le module de base, d'une hauteur de 3.5m et une largeur de 2.7m, consiste en des éléments de fenêtres avec des ouvertures dans la couche intérieure active et un panneau PV dans la couche extérieure. Dans le cadre d'un concept spécial, une protection solaire additionnelle est intégrée dans les volets extérieurs. La structure des panneaux solaires est faite de verre de sécurité laminé, consistant en deux panneaux en verre trempé de 6mm avec des couches de différentes épaisseurs. Dans le verre utilisé pour la protection solaire à l'arrière de la couche extérieure, on a imprimé un film à motif blanc selon le concept de l'architecte. Le verre PV est fait de cellules PV incrustées entre deux épaisseurs de verre. Pour le côté esthétique, on a eu recours au «gris foncé» à l'arrière du verre. On dispose d'une surface PV totale de 500 m². Chaque module consiste en 133 cellules monocristallines d'une capacité de 555 Wp. La capacité totale du système dans l'enveloppe de la façade verticale est de 63 kWp. Le système a été complètement installé avec les câbles et les onduleurs. Les façades actives sont connectées indépendamment à leurs propres onduleurs, pour éviter les pertes d'énergie dans les modules PV montés en série à cause de leurs différents angles d'inclinaison. L'énergie active dans l'enveloppe du bâtiment est une caractéristique majeure du concept et contribue énormément à son efficacité énergétique. Un système modulable d'éléments préfabriqués a facilité leur montage et leur raccordement au sol, en juste 8 semaines. Cette façade est un chef-d'œuvre architectural et un bon exemple d'application du BIPV.

Salut au soleil

Emplacement: Zadar, Croatie

Usage: Monument

Projet: Nikola Bašić

Modules: 328 VSG 6/12/12 walkable

Dimensions: max. 1.102 x 1.102 mm

Le salut au soleil est situé dans un port à Zadar à l'ouest de la péninsule du même nom, près de l'orgue maritime. C'est un endroit qui donne sur le port de la ville, les îles et le coucher du soleil de Zadar. Le monument symbolise le soleil avec des plaques absorbant l'énergie solaire le jour la transformant en des effets spéciaux le soir.

Il utilise l'énergie solaire pour créer un jeu de lumière le soir. Après le coucher du soleil, les éléments d'éclairage sont activés et selon un scénario bien défini, ils produisent un spectacle très impressionnant.

L'installation artistique consiste en 300 plaques de verre multicouches intégrées dans le quai de pierre avec une forme circulaire de 22m de diamètre. Les gens peuvent même marcher dessus. Sous chaque plaque de verre, on retrouve des modules PV.



Fig 28 Salut au soleil, Zadar, Croatie

Il y a également une série de points d'éclairage sous le verre, consistant en plus de 10000 ampoules minuscules. Chaque ampoule change d'intensité et de couleur à travers un ordinateur. En effet, il s'agit d'une installation qui peut produire de la lumière pour illustrer toute sensation, passer des messages et pour projeter des formes. Dans l'avenir, en entrant dans le cercle lumineux, un passant pourra causer une réaction lumineuse spécifique. Une personne causera une réaction, une deuxième personne en causera une deuxième, 10 personnes causeront 10 effets cumulés. L'intention du concepteur était de combiner l'espace urbain au plaisir du jeu, des rencontres et du contact avec la nature tout en mettant l'accent sur un endroit où les habitants aiment retourner et se retrouver tout en renforçant le sens d'appartenance à la ville.



Fig 29, 30 Salut au soleil, Zadar, Croatie



Fig 31 Salut au soleil, Zadar, Croatie

Générique

Couverture ©Johan Depres

01 _ Introduction

Couverture

"Projet BIPV - Gare TGV de Perpignan" by Issolsa. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

http://en.wikipedia.org/wiki/Building-integrated_photovoltaics#/media/File:Projet_BIPV_-_Gare_TGV_de_Perpignan.jpg

02 _ Types de Modules PV

Couverture ©Maddalena Achenza

Fig 1

©Maddalena Achenza

Fig 2

Final installation and layout of Uni-Solar Ovonic's thin Film Flexible Solar PV panels, "Heckert GNU white" by Aurelio A. Heckert <aurium@gmail.com> - gnu.org. Licensed http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thin_Film_Flexible_Solar_PV_Ken_Fields_1.JPG#/media/File:Thin_Film_Flexible_Solar_PV_Ken_Fields_1.JPG

Fig 3a

©Naked Energy Ltd
www.nakedenergy.co.uk/product/domestic-sector

Fig 3b

©Naked Energy Ltd
www.nakedenergy.co.uk/product/domestic-sector

Fig 4

©UNICA

Fig 5

©Giuseppe Desogus

Fig 6

©Giuseppe Desogus

Fig 7a

©UNICA

Fig 7b

Dawn solar panel by NASA/George Shelton May 21, 2007

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dawn_solar_panel.jpg#/media/File:Dawn_solar_panel.jpg

Fig 8

©Antonella Trombadore

Fig 9

©UNICA

Fig 10

© the Condensed Matter Physics Group at the University of Manchester
www.condmat.physics.manchester.ac.uk/images/pictures/graphene%20crumpled.jpg

Fig 11

Antti Veijola_©VTT Technical Research Centre of Finland
www.vtt.fi

Fig 12

Antti Veijola_©VTT Technical Research Centre of Finland
www.vtt.fi

Fig 13

©Antonella Trombadore

Fig 14

© LIN GMBH

<https://acdn.architizer.com/thumbnails-PRODUCTION/4d/14/4d140278394c0c9ea5bb297b29cbcaed.jpg>

03 _ Intégration photovoltaïque

Couverture ©Francesca Muru

Fig 1

"Akademie Mont-Cenis view inside 1" by Arnold Paul - Own work. Licensed under CC BY-SA 2.5 via Wikimedia Commons
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Akademie_Mont-Cenis_view_inside_1.jpg

Fig 2

"Thin Film Flexible Solar PV Installation 2" by Fieldsken Ken Fields - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d8/Thin_Film_Flexible_Solar_PV_Installation_2.JPG

Fig 3

Ministerio de Fomento, SML House Universidad CEU Cardenal Herrera de Valencia (España), Solar Decathlon Europe 2010
www.flickr.com/photos/fomentogob/5664571683/?rb=1

Fig 4a

©Maddalena Achenza

Fig 4b

©Maddalena Achenza

Fig 5a

© Mohsen Saleh
www.mohsen-saleh.com/2012/02/hybrid-solar-thermal-facade-linear.html

Fig 5b

© Mohsen Saleh
www.mohsen-saleh.com/2012/02/hybrid-solar-thermal-facade-linear.html

Fig 5c

© Mohsen Saleh
www.mohsen-saleh.com/2011/10/light-farm.html

Fig 6

©Antonella Trombadore

Fig 7

©Antonella Trombadore

Fig 8

Fàbrica Aymerich, Amat i Jover (Terrassa)
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:03_Mnactec_%28Terrassa%29.JPG

Fig 9

"Akademie Mont-Cenis view inside 1" von Arnold Paul - Eigenes Werk. Lizenziert unter CC BY-SA 2.5 über Wikimedia Commons
http://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Mont_Cenis#/media/File:Akademie_Mont-Cenis.

Fig 10

©STWH - STADTWERKE-HERNE
www.stadtwerke-herne.de/index/unternehmen/presseservice/bildergalerie.html

04 _ Améliorer la perspective sociale, institutionnelle et des concepteurs de bâtiments

Couverture BAPV solar-facade" by Hanjin Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons

http://en.wikipedia.org/wiki/Building-integrated_photovoltaics#/media/File:BAPV_solar-facade.JPG

05_ BIPV performance

Couverture ©Johan Depres

06_ Good practices

Couverture ©Johan Depres

Fig 1-2

©PERI GmbH

www.peri.com/en/press/press-releases/pm2012/desert_learning_center.cfm

Fig 3-4

©Antonella Trombadore

Fig 5

SCD-12-ESS-LIN-Cite du Design opening, 2009, photo: Jan Oliver Kunze
www.lin-a.com
www.lin-a.com/gallery/arms-manufacture-design-lin-project-orta-platine-saint-etienne/cite-du-design

Fig 6

SCD-22-ESS-LIN-aerial view of the platine, photo: Christain Richters
www.lin-a.com
www.lin-a.com/gallery/arms-manufacture-design-lin-project-orta-platine-saint-etienne/cite-du-design

Fig 7

©Johan Despres

Fig 8

© Photo Jean-Paul Azam
www.flickr.com/photos/jpazam/8724497059

Fig 9

Perpignan - Gare. Photo by C D _Fr, licensed under CC BY-SA 2.0
[Link to media: http://bit.ly/1H41Pt](http://bit.ly/1H41Pt)

Fig 10

© imaGiltaire 2013
www.flickr.com/photos/45993822@N07/8561642563

Fig 11

Musikkens Hus åbning. Photo by EHRENBORG Kommunikation, licensed under CC BY 2.0
[Link to media: http://bit.ly/1H6Eh13](http://bit.ly/1H6Eh13)

Fig 12-13-14

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/hom.pdf

Fig 15

Museu de la Ciència i de la Tècnica de Catalunya. Photo by Enfo, licensed under CC BY-SA 3.0

[Link to media: http://bit.ly/1R17rMX](http://bit.ly/1R17rMX)

Fig 16

Photovoltaic wall near Barcelona, Spain. Photo by Chixoy, licensed under CC BY-SA 3.0

[Link to media: http://bit.ly/1cvR2FC](http://bit.ly/1cvR2FC)

Fig 17-18

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/kimbell-art.pdf

Fig 19

Piano Pavilion Kimbell, Fort Worth TX. Photo by Timothy Brown, licensed under CC BY 2.0

[Link to media: http://bit.ly/1H6FwNP](http://bit.ly/1H6FwNP)

Fig 20-21-22

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/klimahaus.pdf

Fig 23-24

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/konstanz.pdf

Fig 25

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/moestl.pdf

Fig 26-27

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/schueco.pdf

Fig 28-29-30-31

©Ertex-Solar
www.ertex-solar.at/media/projekte/zadar.pdf

Bibliographie

I. Hermannsdorfer, C. Rub
Solar Design- Photovoltaics: Old Buildings, Urban Space, Landscapes
JOVIS Verlag, Berlin 2005

A. Basnet

Architectural Integration of Photovoltaic and Solar Thermal Collector Systems into buildings
Master's Thesis in Sustainable Architecture Norwegian University of Science and Technology Faculty of Architecture and Fine Arts - Department of Architectural Design, History and Technology
Trondheim, June 2012

Reijenga, TH and Kaan, HF.
PV in Architecture, in A. Luque, S. Hegedus
Handbook of Photovoltaic Science and Engineering
John Wiley & Sons Ltd, 2003

M. C. Munari Probst, C. Roecker
Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems
EPFL Press, Lausanne 2011

Coordinateur de projet



Università degli Studi di Cagliari

University of Cagliari
DICAAR and DSSI (Italy)
www.unica.it

Partenaires du projet



Association of Mediterranean Chambers of
Commerce and Industry (Spain)
www.ascame.org



Special Agency
Centre of Services for Enterprises (Italy)
www.csimprese.it



Confederation of Egyptian
European Business Associations (Egypt)
www.ceebea.org



Industrial Research Institute (Lebanon)
www.iri.org.lb



الجمعية العلمية الملكية
Royal Scientific Society

Royal Scientific Society (Jordan)
www.rss.jo



Chamber of Commerce and Industry
of Tunis (Tunisia)
www.ccitunis.org.tn



REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

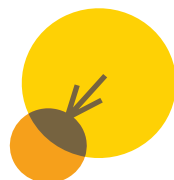
Autonomous Region of Sardinia
Industry Department (Italy)
www.regione.sardegna.it

Associés



Sardinia Mediterranean Foundation (Italy)
www.sardegnameiterranea.org

Pour plus d'informations, veuillez contacter:



FOSTERinMED

Bureau administratif du projet

UNICA - DICAAR

Via Marengo 2 - 09123 Cagliari Tel. +39 070 6755811

email: management@fosterinmed.eu

www.fosterinmed.eu

Nous sommes en ligne !

<http://twitter.com/fosterinmed>

<http://slideshare.net/fosterinmed>

<http://youtube.com/fosterinmed>

<http://facebook.com/fosterinmed>



TÉLÉCHARGEZ LES ANNEXES

