

STAGE ACADÉMIQUE

« Le solaire au sein des énergies nouvelles et renou

ARNAUD BRUGIER, GUILLAUME LE GUERN^[1]

Ce stage, proposé par l'académie de Versailles, répond aux attentes induites par la réforme des lycées en matière de formation des enseignants. Voici les concepts généraux qu'il présente.

Dans un prochain numéro seront développés la technologie solaire, ses applications liées à l'habitat et le dimensionnement des systèmes mis en œuvre.

Le stage

Les objectifs

Le stage intitulé « Le solaire au sein des énergies nouvelles et renouvelables » a été inscrit au plan de formation de l'académie de Versailles au cours de l'année scolaire 2007-2008, sous l'impulsion de l'inspection académique STI. Cela fait donc maintenant trois ans que les collègues de la filière peuvent y participer. Cinq sessions d'une vingtaine de participants chacune ont été ouvertes.

Cette action de formation trouve son origine dans le besoin de restituer le stage du Cerpet STI (www.cerpet.education.gouv.fr) que nous avons effectué ensemble à l'Ines (Institut National de l'Énergie Solaire) au Bourget-du-Lac en Savoie pendant l'été 2006. Cette proposition avait été lancée à l'ensemble des participants (une équipe par académie) par l'Inspection générale afin d'anticiper la réforme du baccalauréat technologique. Si cette dernière n'a pas vu le jour, la nouvelle filière STI2D sera elle bien mise en place à la rentrée prochaine, et les enseignants concernés doivent s'y préparer.

Outre la présentation des principes généraux qui régissent les applications de conversion et d'utilisation de l'énergie solaire, ainsi que la découverte des technologies actuelles, notre formation se fixe les objectifs suivants :

- **Partager** les connaissances et expériences personnelles (formateurs et stagiaires).
- **Réfléchir** à l'introduction de ces contenus dans les enseignements :
 - exploratoires de seconde (SI, CIT) ;
 - du baccalauréat technologique STI2D « Énergie & environnement » ;
 - du baccalauréat S Sciences de l'ingénieur ;
 - des STS Électrotechnique, Fluides énergies environnements...

[1] Respectivement professeur certifié de génie électrique au lycée Isaac-Newton de Clichy (92) et professeur agrégé de génie énergétique au lycée Viollet-Le-Duc de Villiers-Saint-Frédéric (78).

mots-clés

énergies renouvelables, conversion

- **Présenter** les principales ressources disponibles.

Initialement basée sur les contenus présentés lors du stage à l'Ines, notre formation a évolué et s'est enrichie pour répondre aux besoins exprimés par les enseignants, notamment quant à l'utilisation d'outils accessibles de modélisation et de simulation des installations, et à la mise en œuvre de matériels déjà présents dans les laboratoires ou disponibles sur le marché.

L'organisation

Le stage se déroule sur trois journées :

- **Journée 1** avec l'ensemble des stagiaires

Accueil / présentation des objectifs et du programme du stage

Présentation des principales ressources dans le domaine

Introduction : problématique énergétique, place du solaire au sein des EnR, chiffres clés

La ressource solaire : définitions et évaluation du potentiel énergétique que peut recevoir une surface plane

Introduction au solaire thermique (applications, typologie des installations)

Introduction au solaire photovoltaïque (applications, segmentation du marché, typologie des installations)

- **Journée 2** avec la moitié des stagiaires

Solaire thermique « actif » : principes, technologies de capteurs, systèmes de production d'eau chaude sanitaire, études de cas et exemples de dimensionnement

Solaire thermique « passif » : conception bioclimatique et solaire de l'habitat, études de cas et exemples de dimensionnement

- **Journée 3** avec la moitié des stagiaires

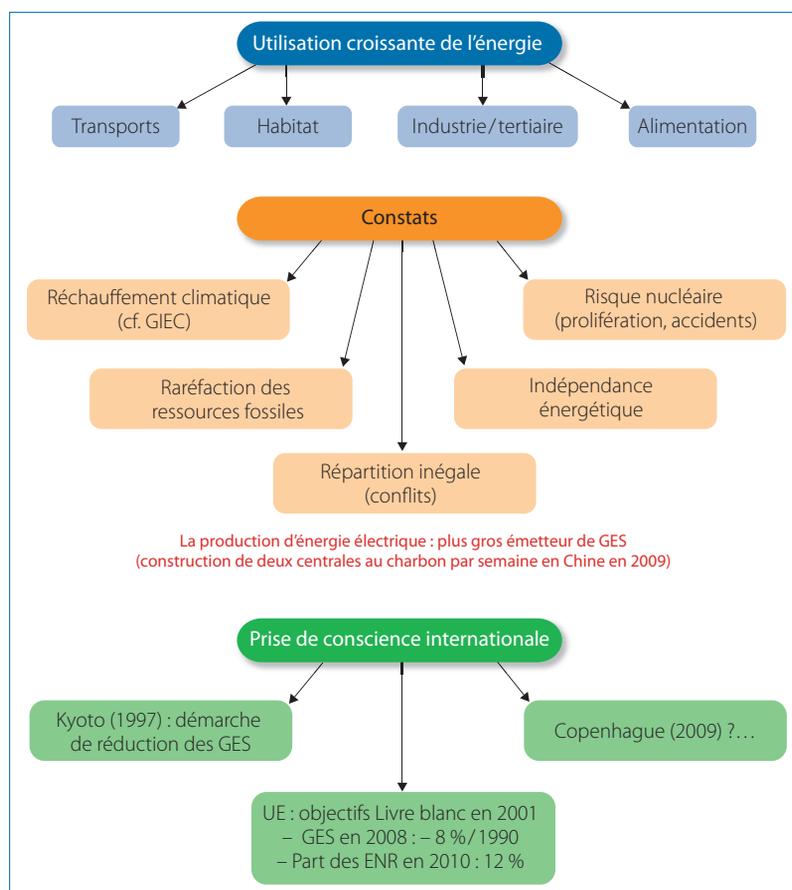
Solaire photovoltaïque : effet photovoltaïque, technologies de capteurs, installations de production en site isolé et raccordées au réseau, études de cas et exemples de dimensionnement

Nous nous proposons de présenter les contenus les plus significatifs de ces journées.

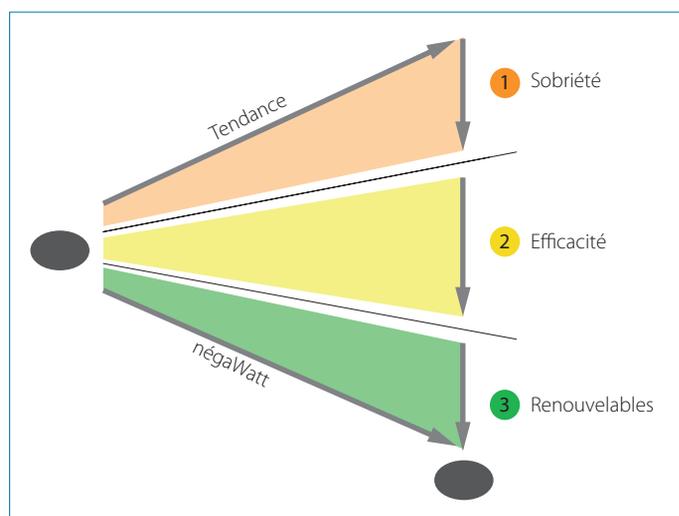
Introduction : problématique énergétique, chiffres clés

Après une rapide introduction aux différentes problématiques induites par l'utilisation de l'énergie **1**, nous mentionnons le « scénario négaWatt » résumant

« renouvelables » (première partie)



1 Les différentes problématiques



2 Les étapes du « scénario négaWatt »

en trois étapes les actions à engager pour en limiter les conséquences **2** :

- 1 **Sobriété énergétique** (comportement des utilisateurs : éducation, formation, sensibilisation, politiques...)
- 2 **Efficacité énergétique** (réglementations et technologies : conception et mise en œuvre systématique)
- 3 **Utilisation des renouvelables** (performants et combinés)

On remarque que l'exploitation de ressources énergétiques d'origine renouvelable n'intervient que dans un troisième temps, pour fournir l'énergie juste nécessaire à la satisfaction d'un besoin.

Ces principes sont mis en avant, à des degrés plus ou moins élevés, par différents acteurs des questions énergétiques qui établissent des scénarios prospectifs basés sur des hypothèses diverses : l'association négaWatt bien sûr, le Cler (Comité de Liaison Énergies Renouvelables), l'AIE (Agence Internationale de l'Énergie)...

Les politiques énergétiques commencent à s'en inspirer. L'Europe, assez en pointe dans ce domaine, tente de les imposer via de nombreuses directives aux pays membres qui les traduisent à leur tour en objectifs chiffrés dans leur politique et dans leur droit. La feuille de route du nouveau plan d'action énergétique de la Commission européenne fixe les objectifs suivants pour 2020 :

- 20 % de baisse des émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport au niveau de 1990
- 20 % de l'énergie finale brute consommée en Europe issue de sources renouvelables
- 23 % de l'énergie électrique finale brute consommée en France issue de sources renouvelables

Une nouvelle directive européenne relative au développement des énergies renouvelables est même adoptée en avril 2009 (2009/28/CE). Elle contraint les objectifs nationaux et fournit les plans d'action État par État.

À la suite de la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations nationales de la politique énergétique, et notamment le principe du « facteur 4 », les lois « Grenelle 1 » et « Grenelle 2 » synthétisent les actions à mener en France afin de tenir les engagements pris auprès de l'UE dans le cadre du « paquet énergie-climat ». Elles fixent les objectifs par secteur d'activité, définissent les responsabilités et compétences nationales, régionales et locales, rappellent le cadre réglementaire et les nouvelles contraintes à créer.



3 Des concentrateurs cylindro-paraboliques

Citons un commentaire du comité opérationnel n° 10, réuni dans le cadre de la préparation du Grenelle Environnement : « Un premier constat est celui de l'énorme besoin de formation professionnelle pour disposer d'installateurs compétents en nombre suffisant. Ce constat renvoie à la demande exprimée dans le groupe 1 du Grenelle de lancement d'un vaste programme de formation dans le secteur du bâtiment et dans le secteur des techniques de l'énergie. »

Quelques définitions

● Installation solaire thermodynamique

« Une installation solaire thermodynamique est un ensemble d'éléments techniques permettant de transformer, à l'aide de capteurs, l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur, puis celle-ci en énergie mécanique et électrique à travers un cycle thermodynamique. » (Arrêté du 12-01-2010)

La concentration du rayonnement solaire 3 entraîne le réchauffement (de 250 à 1 000 °C) d'un fluide caloporteur (huile ou sels fondus) qui stocke l'énergie. Celle-ci est généralement utilisée pour produire de la vapeur d'eau, qui entraîne un turboalternateur.

● Système solaire photovoltaïque

« Un système photovoltaïque est un procédé, ou une solution technique de construction, rigide ou souple, composé d'un module ou d'un film photovoltaïque et d'éléments non productifs assurant des fonctions de



4 La centrale terrestre de Waldelgesheim (Allemagne)

fixation aux éléments mitoyens, de résistance mécanique ou d'étanchéité. L'ensemble est conçu spécifiquement pour la production d'électricité d'origine photovoltaïque. » (Arrêté du 12-01-2010)

● Installation solaire photovoltaïque 4

« L'installation photovoltaïque est un ensemble composé du système photovoltaïque et des éléments assurant la transmission et la transformation du courant électrique (câblages, onduleurs, etc.). » (Arrêté du 12-01-2010)

L'électricité solaire photovoltaïque (PV) peut alimenter un site isolé ou être injectée dans un réseau de distribution.

● Installation solaire thermique

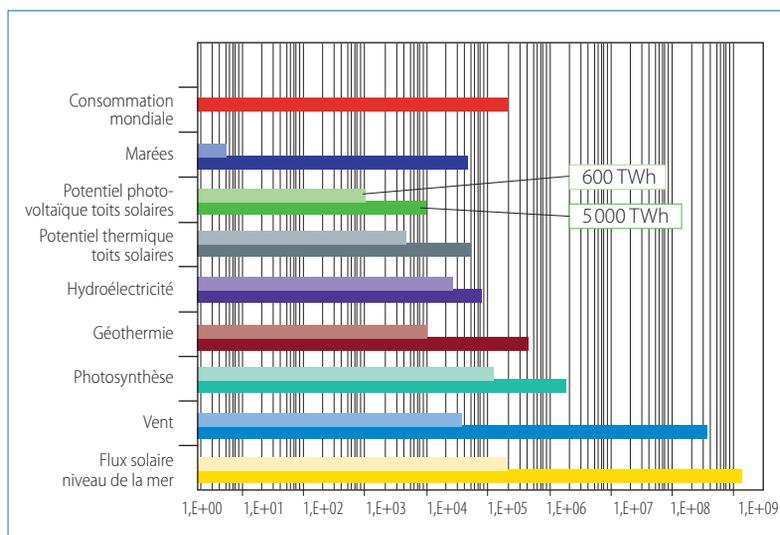
Une installation solaire thermique est un ensemble d'éléments techniques permettant de transformer, à l'aide de capteurs, l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur. Cette chaleur est par la suite distribuée par un fluide caloporteur vers des utilisations secondaires (chauffage, production d'eau chaude sanitaire...).

Des ressources énergétiques renouvelables, l'énergie solaire est de loin la première. Non seulement parce qu'on peut l'exploiter directement pour ses propriétés radiatives, mais aussi parce qu'elle est à l'origine de beaucoup d'autres (biomasse, vent, hydroélectricité...).

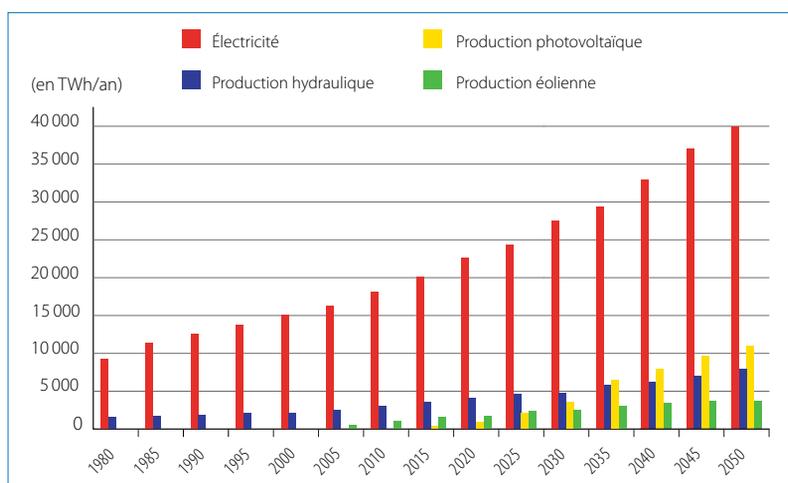
Alain Ricaud, du bureau d'expertise et de conseil Cythelia, estime que les différentes sources d'énergie renouvelable pourraient en pratique couvrir la consommation mondiale actuelle de 10 Gtep (tep : tonne équivalent pétrole) ou 116 000 TWh : la photosynthèse au premier chef avec 6 Gtep (70 000 TWh), puis le vent avec 1,7 Gtep (20 000 TWh), la grande hydraulique 1,2 Gtep (14 000 TWh), le solaire installé sur les toits des bâtiments industriels, commerciaux, tertiaires et domestiques 0,25 Gtep (2 900 TWh, dont 2 300 TWh thermiques et 600 TWh photovoltaïques) et la géothermie des couches profondes 0,2 Gtep (2 300 TWh) 5.

Les principales contributions attendues sont celles de la biomasse, de l'hydraulique et de l'éolien. Cela dit, la technologie photovoltaïque a ses propres atouts et un rôle important à jouer dans le décollage du développement des pays les moins avancés (zones rurales). Pour Alain Ricaud, l'origine photovoltaïque de l'électricité, bien qu'insignifiante à l'heure actuelle, pourrait bien être majoritaire en 2050 parmi les EnR 6.

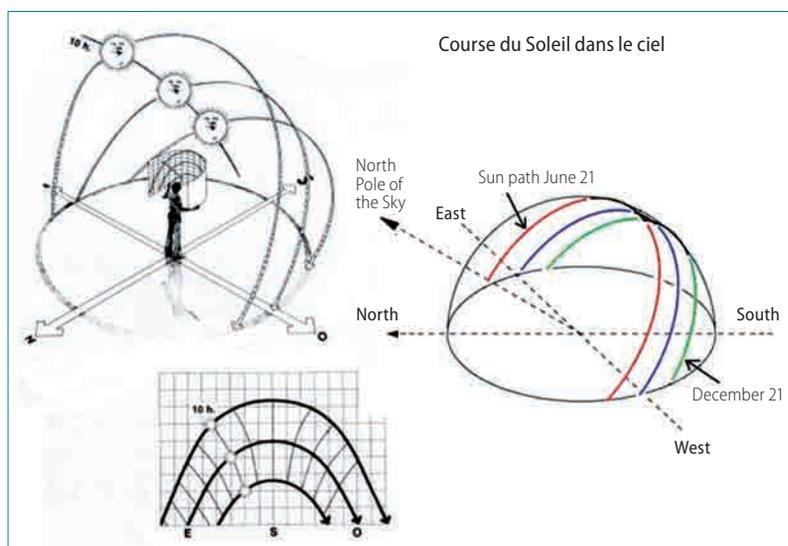
De fait, la production d'électricité d'origine PV augmente de façon quasi exponentielle depuis quelques années, comme on le constatera à la lecture des informations détaillées sur le parc et le marché fournies par les baromètres EurObserv'ER (voir en encadré). Pour avoir une vision plus précise au plan national, les stagiaires sont invités à consulter la présentation de l'état du parc solaire photovoltaïque au 31-12-2009 et le bilan de l'année 2009 réalisés par le Syndicat des énergies renouvelables (SER/SOLER).



5 Le potentiel extractible par rapport au potentiel absolu des différentes sources d'énergie renouvelable en TWh/an



6 Les perspectives d'évolution des parts des EnR dans la production mondiale d'électricité



7 Les modèles permettant d'évaluer le rayonnement perçu pour une latitude et une longitude données

Cette partie se termine par quelques considérations sur les politiques et outils législatifs mis en place pour aider au développement de ces filières, et sur l'évolution des réglementations, notamment de la réglementation thermique (RT 2012).

Gisement solaire, ou comment évaluer l'énergie solaire reçue par une surface

Afin de prévoir les performances d'une application solaire, qu'elle soit thermique ou photovoltaïque, il est nécessaire de pouvoir évaluer le potentiel énergétique que peut recevoir une surface composant un dispositif de captation solaire (vitrage, capteur...).

Cette tâche n'est pas si simple. Il existe bien évidemment des modèles qui permettent d'évaluer pour une latitude et une longitude données et par temps clair le rayonnement perçu par une surface plane horizontale **7**. Ces modèles intègrent essentiellement des paramètres liés à la mécanique céleste : variation temporelle de la déclinaison, de la durée du jour, de la distance Terre-Soleil... Ils permettent de déterminer la durée du jour, le temps solaire vrai, la position angulaire du Soleil dans le ciel à chaque instant (hauteur H et azimut A), et donc le tracé de diagrammes solaires.

Quant au potentiel énergétique, chacun le perçoit bien, la météorologie vient perturber de manière assez aléatoire ce que ces modèles peuvent prédire. Il faut alors avoir recours à une approche « statistique » et utiliser des valeurs moyennes intégrant, pour une période déterminée, les tendances météorologiques d'un lieu.

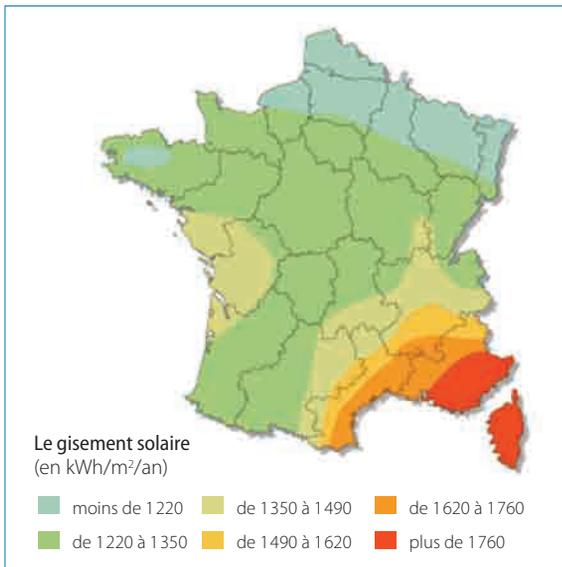
Le fruit de nombreuses observations suivies d'études statistiques nous permet aujourd'hui d'accéder, sous forme de cartes **8** ou de bases de données, aux valeurs de l'énergie moyenne reçue par un plan en un lieu donné.

N'allez cependant pas croire en voyant ces cartes que l'énergie solaire n'est disponible que dans le Sud, en période estivale, au moment où un soleil radieux nous impose de trouver de l'ombre. Le rayonnement solaire ressenti principalement dans cette situation est le rayonnement direct (celui qui génère une ombre). Ce rayonnement ne porte cependant pas toute l'énergie du rayonnement solaire **9**. En effet, le rayonnement diffus, dont la valeur varie beaucoup avec la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère (vapeur d'eau, poussières), peut constituer une part non négligeable du potentiel énergétique total.

Le graphique **10** représente l'évolution horaire des flux énergétiques moyens global, diffus et direct, à Paris au mois de décembre. Il apparaît clairement que dans ce cas la part du rayonnement diffus n'est pas négligeable d'un point de vue énergétique.

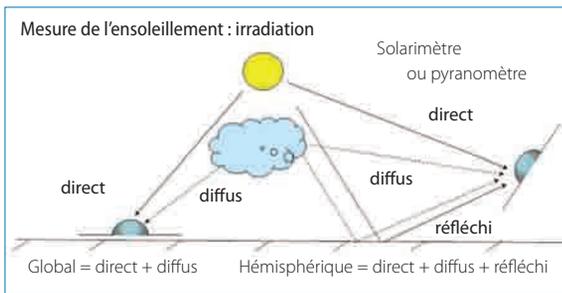
Comment déterminer alors le potentiel énergétique reçu par une surface orientée (O) et inclinée (I) de manière quelconque à partir des données météorologiques ?

Si l'on souhaite avoir des valeurs moyennes mensuelles, le site de l'Ines met librement à disposition l'outil de

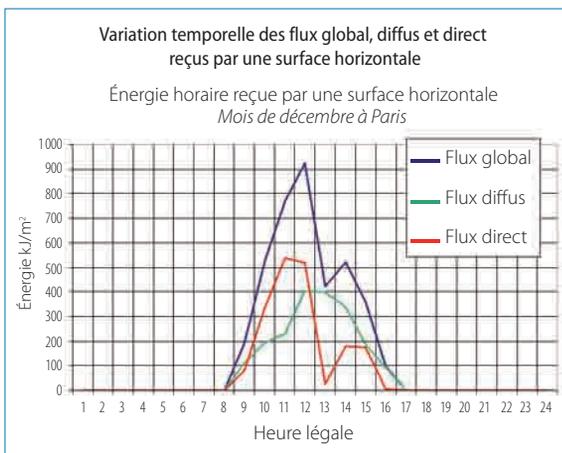


SOURCE : ADEME

8 Les valeurs de l'énergie annuelle moyenne reçue par une surface plane en un lieu donné



9 L'ensoleillement global et hémisphérique



10 L'évolution horaire des flux énergétiques à Paris au mois de décembre

calcul CalSol **11**. Une autre application libre mise en ligne par la Commission européenne, nommée PVGIS, permet également d'évaluer rapidement le potentiel énergétique d'un site.

Si l'on souhaite obtenir des valeurs à partir d'un fichier au pas de temps horaire, il faut alors pour chaque heure sommer les flux direct, diffus et réverbéré diffus reçus par cette surface.

CalSol - gisement solaire

Choix de la ville : Paris le Bourget Prendre en compte un masque : non

Inclinaison du plan : verticale Orientation du plan : Sud Albédo du sol : 0.2

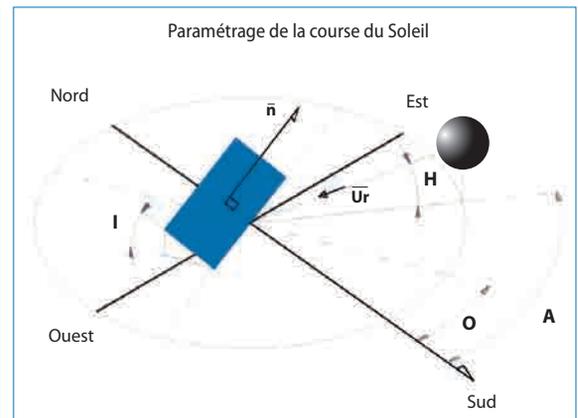
Irradiation sur un plan horizontal en kWh/m² par jour ou en kWh/m² cumulés

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Globale (IGH)	0.87	1.52	2.88	3.92	5.01	5.59	5.33	4.44	3.38	1.98	0.99	0.72	3.06
Directe (IBH)	0.25	0.5	1.27	1.68	2.3	2.67	2.51	2	1.53	0.77	0.28	0.19	1.33
Diffuse (IDH)	0.62	1.02	1.61	2.24	2.71	2.92	2.82	2.44	1.85	1.21	0.71	0.53	1.73

Irradiation sur un plan d'inclinaison 90° et d'orientation 0°

Irradiation :	jan	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	sep	oct	nov	déc	année
Directe (IBP)	0.8	1.06	1.65	1.2	0.96	0.83	0.88	1.12	1.55	1.37	0.8	0.71	1.08
Diffuse (IDP)	0.31	0.51	0.8	1.12	1.35	1.46	1.41	1.22	0.92	0.61	0.35	0.26	0.86
Réfléchie (IRP)	0.09	0.15	0.29	0.39	0.5	0.56	0.53	0.44	0.34	0.2	0.1	0.07	0.31
Globale (IGP)	1.19	1.72	2.74	2.71	2.82	2.85	2.82	2.78	2.81	2.18	1.25	1.04	2.24

11 Le calcul avec CalSol du potentiel énergétique d'un plan vertical orienté plein sud à Paris



12 Les paramètres liés à la position du soleil

Pour le flux direct, la position du soleil **12** a toute son importance, et il faut à partir des modèles cités plus haut déterminer à chaque heure hauteur et azimut du soleil. Un produit scalaire avec la normale à la surface permet alors de connaître le flux perçu par cette surface par rapport au flux direct reçu par une surface horizontale.

Pour le flux diffus, c'est un facteur géométrique lié à la portion de demi-espace vue par la surface qu'il faut considérer afin de déterminer la part du flux diffus horizontal perçu par la surface :

$$\Phi_{dS} = [(1 + \cos I) / 2] \Phi_{dH}$$

Quant au flux réverbéré diffus, il sera calculé à partir de la valeur du flux global reçu par une surface horizontale, affectée d'un facteur correctif prenant en compte d'une part la capacité de réverbération du sol, intégrée dans un facteur appelé albédo noté *a*, et d'autre part un facteur géométrique lié à la portion d'espace occupée par le sol du point de vue de la surface réceptrice :

$$\Phi_{rds} = a [(1 - \cos I) / 2] \Phi_{GH}$$

Il est alors assez surprenant de constater le potentiel énergétique disponible à des moments où le soleil ne brille pas de mille feux, loin de là. Prenons le cas d'un 24 décembre enneigé en région parisienne et d'une surface vitrée orientée plein sud. L'évaluation de l'énergie incidente à 12 heures solaires donne les résultats suivants :

Données météo :

Flux global : $\Phi_{GH} = 420 \text{ kJ/m}^2/\text{h}$

Flux diffus : $\Phi_{dH} = 400 \text{ kJ/m}^2/\text{h}$

Flux direct : $\Phi_{dH} = 20 \text{ kJ/m}^2/\text{h}$

Température extérieure : -5°C

Sol enneigé :

$a = 0,8$

Position baie vitrée :

Inclinaison : $I = 90^\circ$

Orientation : $O = 0^\circ$

Flux reçu par la paroi vitrée :

$\Phi_3 = 6,39 + 0,5 \times 400 + 0,8 \times 0,5 \times 420 = 374,4 \text{ kJ/m}^2/\text{h}$

Soit une puissance moyenne reçue de 104 W/m^2 , à comparer à une perte de ce vitrage de l'ordre de 45 W/m^2 . Sachant que le facteur solaire (le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie reçue par un vitrage) de ce type de vitrage est de l'ordre de 70 %, cette paroi vitrée apporte une puissance de 28 W/m^2 .

Un vitrage 4/16/4 sur menuiserie PVC ayant un coefficient de transmission U_w de l'ordre de $1,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$ générerait une perte de chaleur de l'ordre de 45 W/m^2 pour une température intérieure de 20°C .

Cet exemple, au-delà du fait d'explicitier les démarches permettant d'évaluer l'énergie incidente sur une surface de capteur, pose un principe important par rapport à l'énergie solaire : c'est dans la somme de petits riens mis bout à bout que réside globalement l'intérêt de l'énergie solaire.

Et des facteurs limitant le flux d'énergie reçu par une surface de capteur, il en existe beaucoup, à commencer par les masques, qu'ils soient lointains, par exemple des montagnes, ou proches, comme une fenêtre non encastree orientée au sud et équipée d'une casquette.

Cette première partie a exposé les contenus théoriques du stage de formation qui sont nécessaires pour appréhender la technologie solaire et ses applications liées à l'habitat ainsi que le dimensionnement de systèmes, qui seront développés dans une seconde partie. ■

Quelques données des baromètres EurObserv'ER

Photovoltaïque

L'Union européenne reste le principal lieu d'implantation des centrales photovoltaïques, avec près de 5,5 GWc installés durant l'année 2009.

78,1 % de la puissance installée dans le monde en 2009 l'a été dans l'UE.

L'augmentation de la puissance installée dans l'UE durant 2009 se chiffre à 5 485,1 MWc.

La croissance du parc de l'UE entre 2008 et 2009 est de + 52,9 %.

La puissance photovoltaïque par habitant en 2009 est de 120,2 Wc en Allemagne contre 4,5 Wc en France (2009).

La puissance photovoltaïque cumulée dans les pays de l'UE en 2008 et 2009 (en MWc) est donnée partiellement sur la figure **a**.

Les objectifs énoncés en 2001 par l'UE dans son Livre blanc de l'énergie sont pulvérisés **b**.

Solaire thermique

La surface de panneaux solaires thermiques installés durant l'année 2009 dans l'UE est de 4 166 056 m².

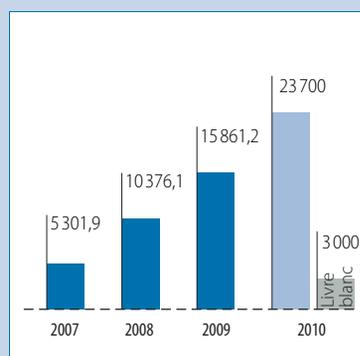
Le parc solaire thermique installé dans l'UE fin 2009 est de 22 786,1 MWth.

La croissance (négative) du marché solaire thermique de l'UE en 2009 est de - 9,6 %.

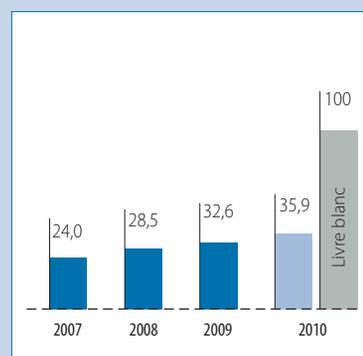
Les objectifs énoncés en 2001 par l'UE dans son Livre blanc de l'énergie sont loin d'être atteints **c**.

	2008			2009		
	Réseau	Hors réseau	Total	Réseau	Hors réseau	Total
Allemagne	5 979,000	40,000	6 019,000	9 785,300	45,000	9 830,300
Espagne	3 402,235	18,836	3 421,071	3 500,000	20,082	3 520,082
Italie	445,000	13,300	458,300	1 019,000	13,400	1 032,400
République tchèque	54,294	0,380	54,674	465,321	0,580	465,901
Belgique	70,870	0,053	70,923	362,970	0,053	363,023
France	82,990	20,912	103,902	268,230	21,119	289,349

a La puissance photovoltaïque cumulée dans les pays de l'UE en 2008 et 2009 en MWc



b La comparaison de la tendance actuelle pour le solaire photovoltaïque avec les objectifs du Livre blanc (en MWc)...



c ... et pour le solaire thermique (en millions de m²)