

STAGE ACADÉMIQUE

« Le solaire au sein des énergies nouvelles et re

ARNAUD BRUGIER, GUILLAUME LE GUERN^[1]

Voici, après la description de ses concepts généraux, une présentation détaillée de la technologie solaire, de ses applications liées à l'habitat et du dimensionnement des systèmes mis en œuvre. Des références essentielles, qui viennent enrichir les ressources qui vous seront indispensables dans le cadre du nouveau baccalauréat STI2D.

Technologie solaire thermique et habitat

Nous avons choisi de limiter nos objets d'étude à ceux que les élèves peuvent rencontrer le plus facilement dans leur environnement proche. Ainsi nous développons dans notre formation une présentation technologique des applications solaires thermiques suivantes : chauffe-eau solaires individuels (CESI), systèmes solaires combinés (SSC). Cette présentation technique suit la chaîne d'énergie (captage de l'énergie, conversion puis utilisation) et a donc pour point de départ les capteurs solaires thermiques. On peut les classer en trois familles :

● Les capteurs non vitrés **1**

Ce sont par exemple la moquette solaire, les toitures solaires.

[1] Respectivement enseignant de génie électrique à l'IUT de Saint-Denis (93) et professeur agrégé de génie énergétique au lycée Viollet-Le-Duc de Villiers-Saint-Frédéric (78).



1 Capteurs non vitrés



3 Capteurs à tubes sous vide



2 Capteurs vitrés

mots-clés

conversion, énergie renouvelable, production

Domaines d'application : basse température (< 30 °C), réchauffage de piscine, préchauffage d'eau chaude sanitaire (ECS)

● Les capteurs plans vitrés **2**

En caisson ou à assembler, ils peuvent se mettre sur châssis ou s'intégrer dans l'architecture des bâtiments.

Domaines d'application : moyenne température (de 20 à 70 °C), production d'ECS et/ou chauffage solaire

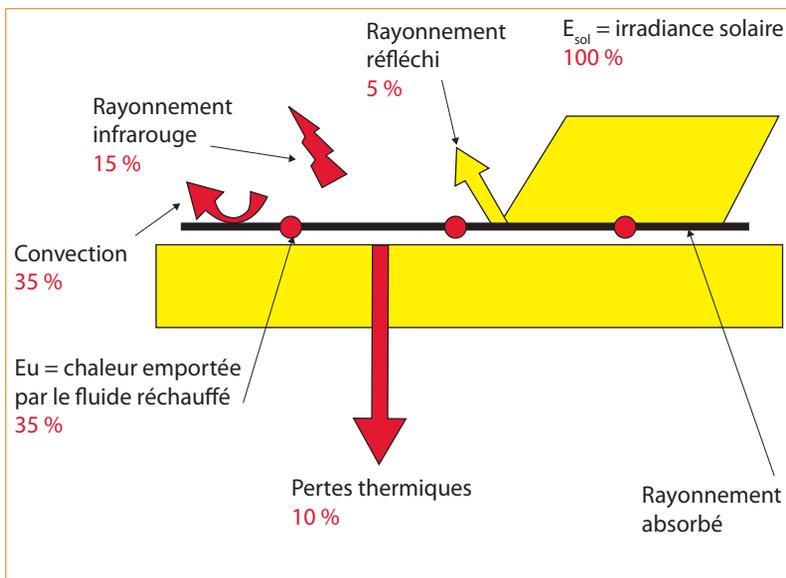
● Les capteurs à tube(s) sous vide **3**

Il en existe plusieurs types : à deux tubes, monotube, à caloduc, à concentrateur en sous-face... Ils permettent tous de satisfaire des applications nécessitant des niveaux de température plus importants (de 60 à 150 °C).

Domaines d'application : applications industrielles, chauffage et production d'ECS, habitat individuel et collectif

Les principes de conversion de l'énergie solaire thermique

Afin de fixer les idées sur les performances énergétiques de ces capteurs, un rappel qualitatif est fait sur les modes de transfert de la chaleur **4 5 6**. Cela permet d'aboutir aux modèles de comportement statique des capteurs thermiques. Un capteur solaire percevant une irradiance E_{sol} (W/m^2) est capable d'en absorber une partie seulement.



4 Le bilan énergétique d'un capteur solaire plan

nouvelables » (seconde partie)

Il existe deux types de pertes, les pertes optiques et les pertes thermiques. Le rendement d'un capteur s'exprime donc de la façon suivante :

$$\eta = \beta - (k / E_{\text{sol}}) (T_{\text{moy eau}} - T_{\text{ext}})$$

β : représentatif des pertes optiques, produit des facteurs α (absorption de l'absorbeur) et τ (transmission au travers du verre)

k : coefficient d'échange thermique global entre l'eau transitant dans le capteur et l'extérieur ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)

$T_{\text{moy eau}}$: température moyenne de l'eau

T_{ext} : température extérieure

En posant

$$X = (T_{\text{moy eau}} - T_{\text{ext}}) / E_{\text{sol}}$$

on obtient :

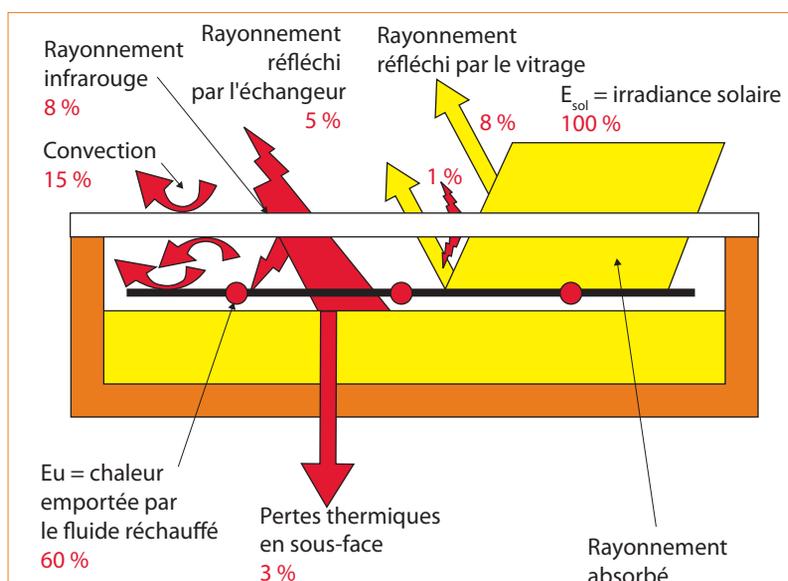
$$\eta = \beta - kX$$

Ou, plus généralement :

$$\eta = a_0 - a_1X - a_2X^2$$

qui est l'expression du rendement selon la norme d'essais des capteurs NF EN 12975-2.

La figure 5 illustre le comportement des capteurs solaires thermiques. On observe bien que lorsque X augmente, ce qui revient à vouloir produire de l'eau de plus en plus chaude avec moins d'ensoleillement, les familles de capteurs se différencient du point de vue de leurs performances thermiques. On remarque dans ces conditions que les capteurs à tube sous vide sont les plus performants.



5 Le bilan énergétique d'un capteur solaire plan vitré

Les systèmes solaires thermiques usuels

Nous continuons cette description des capteurs sur des considérations liées à des innovations permettant d'améliorer leurs performances, puis nous poursuivons par une présentation des systèmes de production d'eau chaude sanitaire solaire, en particulier les chauffe-eau solaires individuels, exposant les points clés de leur conception, leur mise en œuvre et leur réglage.

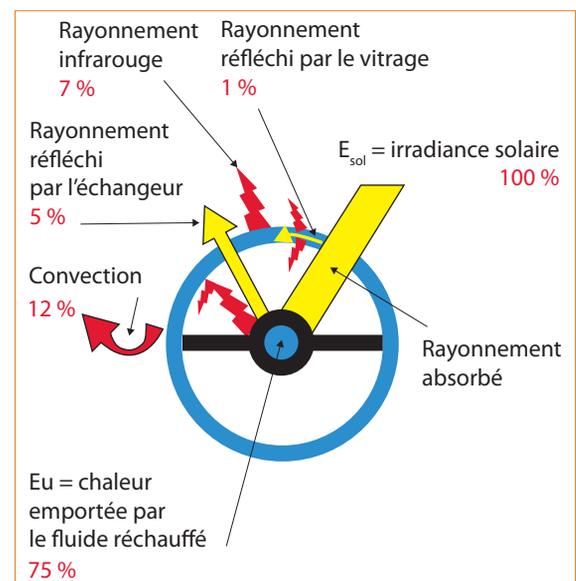
Ces systèmes se décomposent en deux familles :

• Les CESI monoblocs à thermosiphon 8

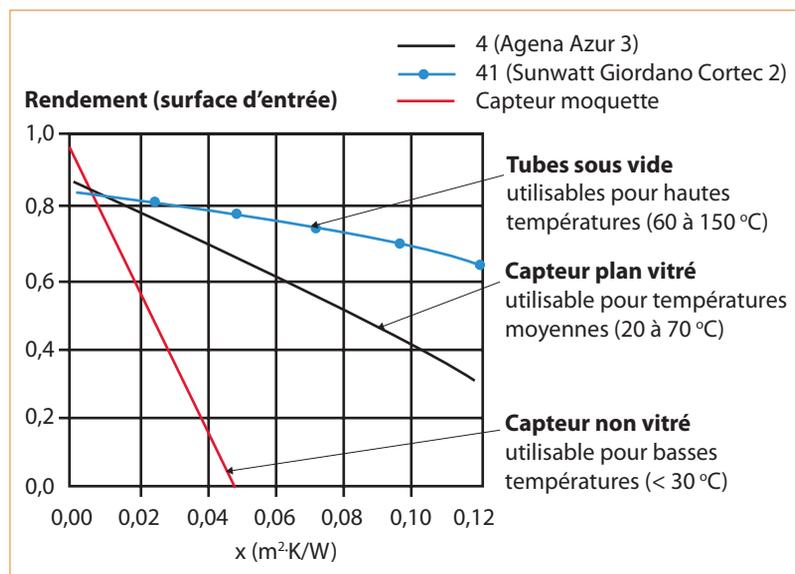
Ils sont composés d'un ou deux capteurs plans vitrés associés à un ballon de stockage d'eau chaude sanitaire (ECS). L'eau réchauffée dans le capteur circule naturellement vers le stockage situé au-dessus de celui-ci grâce au phénomène de thermosiphon. L'ECS peut circuler directement dans les capteurs, mais, pour des raisons sanitaires, il est préférable de séparer fluide caloporteur et ECS. Un échangeur de type « serpent » transfère alors la chaleur récupérée par le capteur vers le stockage d'ECS.

Un appoint d'énergie est nécessaire pour assurer la couverture des besoins en toute saison. Les performances de ce système sont en effet assez limitées, dans la mesure où, pour que l'eau circule, le capteur doit être assez chaud.

Ces systèmes sont pourtant très fiables, car, hors appoint éventuel, ils sont complètement autonomes. Ils sont parti-



6 Le bilan énergétique d'un capteur à tube sous vide



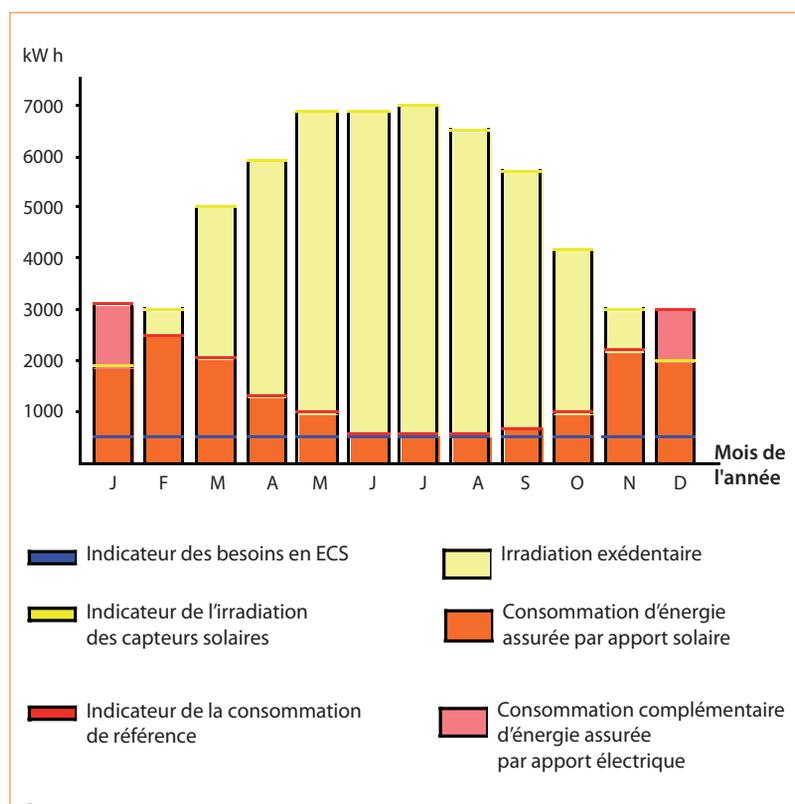
7 Le rendement thermique des capteurs solaires



8 CESI à thermosiphon



9 CESI à circulation forcée



10 Les résultats de la simulation

culièrement adaptés aux régions où les températures sont assez clémentes, voire chaudes, et où la ressource solaire est importante : pays méditerranéens, Afrique...

● Les CESI à circulation forcée 9

Ils sont un peu plus sophistiqués, dans la mesure où le transfert énergétique entre les capteurs et le ballon de stockage est forcé par une pompe. Le ballon d'eau chaude sanitaire, positionné verticalement, est réchauffé en sa partie inférieure par un échangeur de chaleur de type serpentin. C'est en effet là que l'eau chaude sanitaire est la plus fraîche, à cause de la stratification thermique. C'est donc là que l'échangeur apportera le plus efficacement l'énergie captée par les capteurs solaires (fonctionnement à basse température). La pompe est pilotée par un régulateur qui autorisera son fonctionnement si la température des capteurs est suffisante, c'est-à-dire supérieure à la température du stock d'ECS en sa partie inférieure de 4 à 7 °C.

Enfin, une dernière partie est consacrée à la présentation des systèmes solaires combinés.

● Les systèmes solaires combinés

Rappelons que l'objectif de ces systèmes est de couvrir pour partie les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire d'un habitat grâce à l'énergie solaire récupérée par des capteurs thermiques. Il est nécessaire de mettre en œuvre des surfaces de capteur bien plus importantes que pour les CESI, et de faire face à des contradictions et des contraintes importantes : si les besoins en ECS sont assez peu variables tout au long de l'année, les besoins en chauffage n'existent que pendant une période plus ou moins courte en fonction de la qualité d'isolation du bâti, et c'est au moment où l'on a le plus besoin de la ressource qu'elle est la plus faible et la plus difficile à exploiter.

Le graphique 10 de synthèse d'une simulation sur une année d'un habitat que l'on projette d'équiper d'un SSC, réalisée avec CASSC, un logiciel distribué par l'Ines, montre bien que la couverture des besoins par l'énergie solaire (consommation solarisable) peut être assez importante.

Un système combiné est donc un système largement équipé de capteurs solaires thermiques, le plus souvent associé à un appoint, qui doit être équipé d'un système de stockage thermique efficace permettant de conserver et de redistribuer l'énergie solaire récupérée par les capteurs. La gestion du stock est particulièrement sensible, puisque les besoins en énergie sont variables et décalés dans le temps entre eux et vis-à-vis de la ressource. Elle requiert des stratégies de stockage/déstockage respectant les phénomènes de stratification dans les ballons 11, ou des stockages dédiés en capacité et en température à chacun des usages 12.

Principe et performances : le cas des CESI

Les chauffe-eau solaires individuels à circulation forcée ont des performances satisfaisantes s'ils sont mis en œuvre

convenablement **13** : orientation sud, inclinaison 45°, 1 m² de capteur pour 50 l de stockage, isolation thermique satisfaisante et régulateur bien réglé. On peut dans ce cas raisonnablement compter sur un taux minimal de couverture des besoins en ECS de 50 % en France métropolitaine. Lorsque l'énergie emmagasinée par les capteurs est suffisante pour être transférée dans le stockage, la pompe solaire doit fonctionner **14**. Elle doit être arrêtée si l'énergie stockée dans les capteurs est insuffisante.

Chaque élément du CESI est passé en revue afin d'en préciser les fonctions et les performances minimales. Les points clés de la conception des systèmes solaires thermiques sont également présentés : rôle de la stratification, efficacité et position des échangeurs, gestion du circulateur.

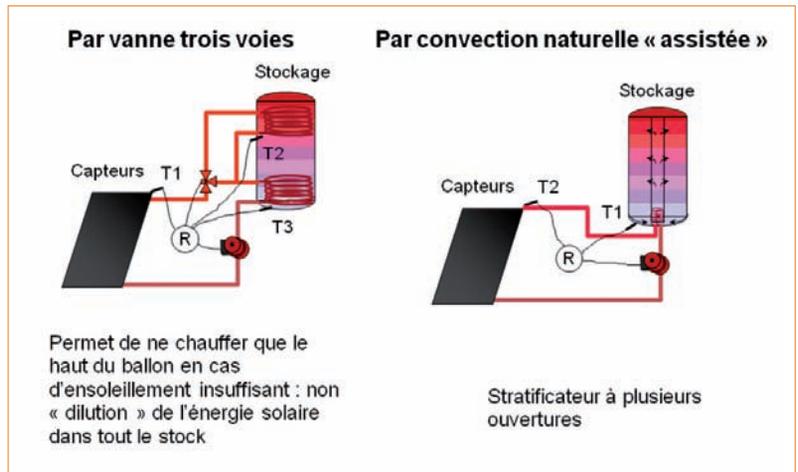
La simulation de systèmes solaires thermiques

Après une première journée de stage bien chargée en termes d'informations et de contenus, nous avons souhaité faire en sorte que les stagiaires puissent se confronter à des outils de simulation et à des manipulations.

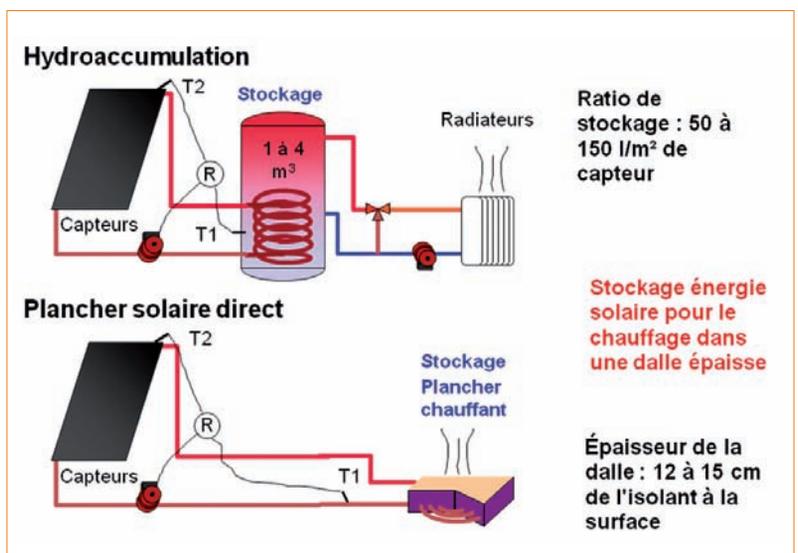
Depuis l'année dernière, nous présentons un CESI réel de la marque Giordano, installé au lycée Viollet-le-Duc de Villiers-Saint-Frédéric, instrumenté et commercialisé par l'entreprise ERM **14**. Cela permet de faire des rappels de la première journée et de répondre à certaines questions pratiques des stagiaires avant d'aborder la simulation. En outre, un certain nombre de mesures réalisées avec le système sont exploitées et permettent par exemple de déterminer expérimentalement le rendement des capteurs **16**.

Les outils

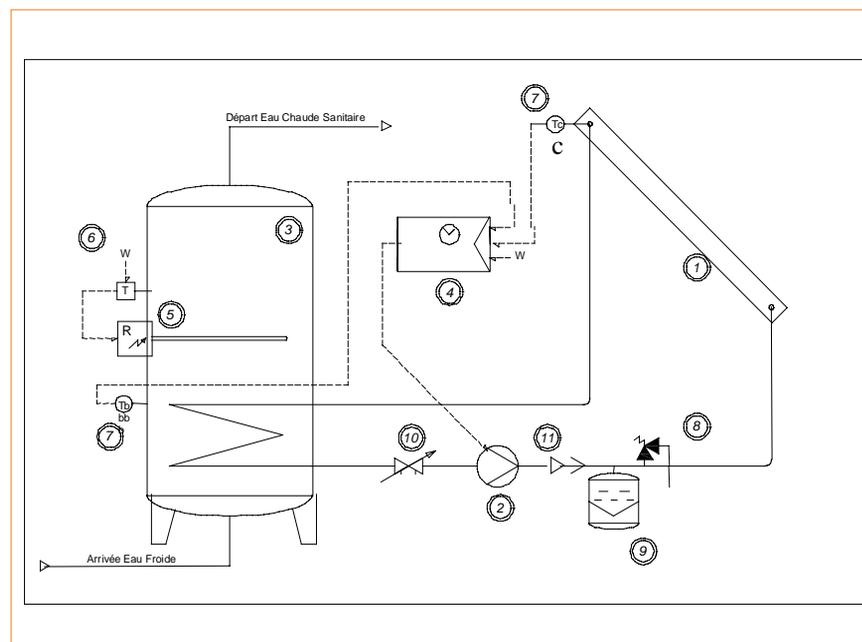
Les outils employés pour la simulation des CESI sont libres, simples d'utilisation, et permettent de répondre à de nombreuses questions technico-économiques :



11 La gestion de la stratification

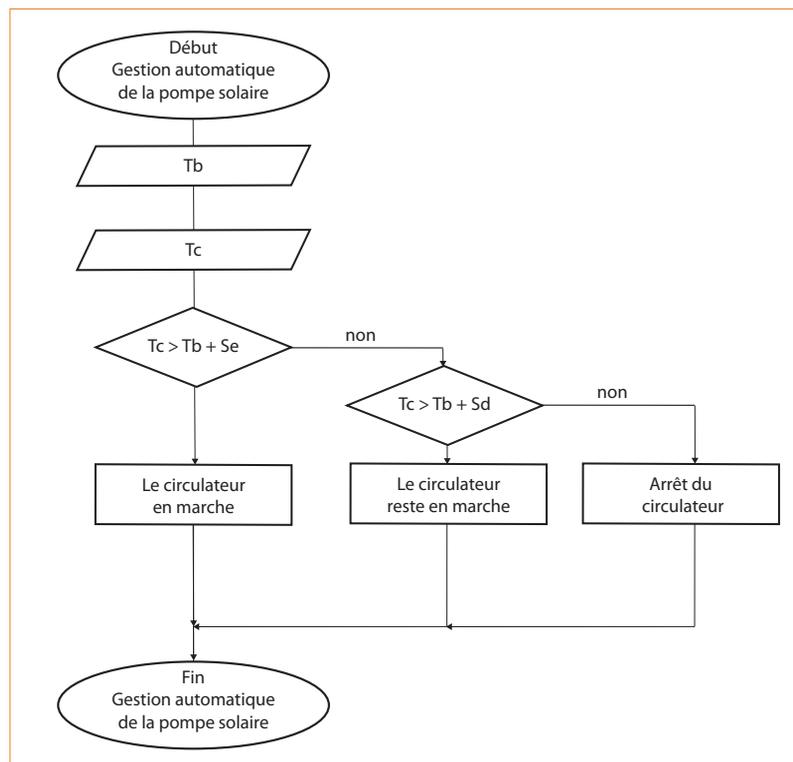


12 Le choix du stockage pour le service chauffage

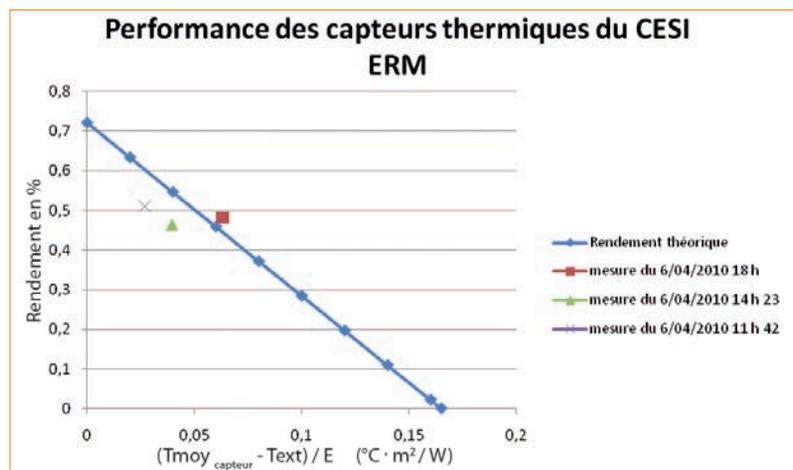


13 Le schéma de principe d'un CESI à circulation forcée équipé d'un appoint électrique

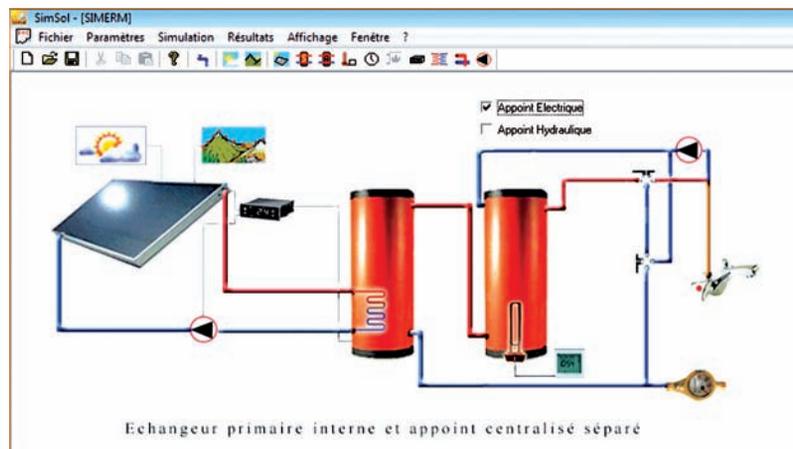
Repère	Désignation	Groupe Fonctionnel
1	Capteur Solaire	Chauffer un fluide caloporteur grâce au rayonnement solaire
2	Pompe de transfert	Distribuer un fluide caloporteur
3	Ballon de stockage	Stocker de l'eau chaude sanitaire
4	Régulateur solaire	Gérer la production solaire
5	Résistance d'appoint	Rechauffer de l'E.C.S. à partir d'électricité
6	Thermostat de régulation	Gérer la production d'E.C.S. électrique
7	Sonde de température	Gérer la production solaire
8	Soupape de sécurité	Distribuer un fluide caloporteur
9	Vase d'expansion	Distribuer un fluide caloporteur
10	Vanne de réglage	Distribuer un fluide caloporteur
11	Clapet antiretour	Distribuer un fluide caloporteur



14 La gestion automatique de la pompe solaire du CESI



16 Le rendement des capteurs solaires en fonction de X



17 Le logiciel SimSol



15 Le CESI ERM

● Le logiciel SimSol 17, fruit d'une collaboration entre le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et l'Ademe, permet de simuler un système de production d'ECS. Conçu pour la simulation de systèmes collectifs importants, il reste néanmoins utilisable pour un CESI moyennant quelques hypothèses. Grâce à ce logiciel, il est possible de faire une étude de productivité montrant par exemple l'impact de la surface du capteur, du taux de couverture et du facteur d'économie d'énergie (Fsav) 18, ou encore une ébauche d'étude technico-économique 19.

● Le logiciel CalSol, développé par l'Ines, permet de faire une simulation moyenne mensuelle et une étude technico-économique fine liée à l'installation d'un CESI.

Afin de prendre en main ces outils, divers supports sont utilisés : la « maison de Sceaux », mais également le CESI réel du lycée Viollet-le-Duc.

Un cas d'application : la maison de Sceaux

Au-delà de la prise en main des outils de simulation, notre objectif est également de donner aux stagiaires une sorte de pack de démarrage constitué de quelques exemples traités plus ou moins complètement et pouvant servir de support pour des élèves. C'est le cas de la maison de Sceaux.

Ce support intègre les problématiques énergétiques actuelles dans le domaine de l'habitat. Il permet en particulier d'aborder une question cruciale : comment réduire la facture énergétique d'un bâtiment ancien dans le cadre d'une rénovation plus ou moins lourde ? Les solutions techniques envisagées pour répondre à cette question dans le cadre de ce projet donnent une part importante à l'énergie solaire : solaire thermique passif (apports gratuits au travers de vitrages), solaire thermique actif (mise en place d'un CESI, par exemple), solaire photovoltaïque raccordé et/ou en site isolé. D'autre part, une pompe à chaleur eau/eau géothermique permet d'apporter l'appoint en chaleur nécessaire pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire.

Les objectifs du maître d'œuvre sont ambitieux, puisqu'il souhaite faire de ce bâtiment une maison à énergie positive, c'est-à-dire une maison qui produise sur une année plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

Un modèle a donc été réalisé avec le logiciel SketchUp afin de montrer l'importance des ombres portées sur cette architecture composite 20.

Les besoins énergétiques annuels estimés pour la maison sont les suivants :

● **Chauffage**

Les besoins bruts sont de $39 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, soit 5 510 kWh pour les 145 m^2 habitables. En partant sur un COP (COefficient de Performance) moyen de 3,4, les besoins en énergie électrique sont estimés pour ce poste à 1 670 kWh. Pour les déterminer, un tableur modélisant le fonctionnement thermique de l'enveloppe du bâtiment a été réalisé dans CalSol, dont un certain nombre de paramètres sont modifiables, ce qui permet de constater la façon dont ils affectent le bilan thermique de la maison 21.

● **Eau chaude sanitaire**

Les besoins bruts sont estimés à 3 800 kWh. La couverture solaire du CESI fait chuter les besoins en énergie électrique à 1 914 kWh, et la pompe à chaleur eau / eau géothermique à 870 kWh, son COP moyen étant estimé à 2,2 sur l'année.

Dans la même journée, le lien est fait avec la technologie photovoltaïque (PV) : il s'agira de vérifier si la productivité de la centrale solaire raccordée au réseau et installée sur la toiture de la maison de Sceaux permet de qualifier cette dernière de maison à énergie positive.

Technologie solaire photovoltaïque et habitat

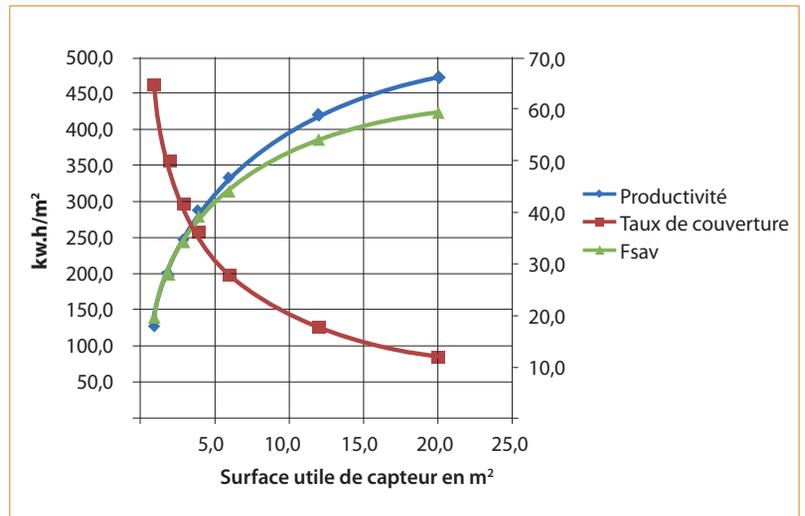
La segmentation du marché

Pour introduire cette technologie, nous présentons la segmentation du marché des installations PV 22. Des exemples sont fournis pour chaque segment, ce qui permet aux stagiaires de mieux appréhender les différentes applications existantes.

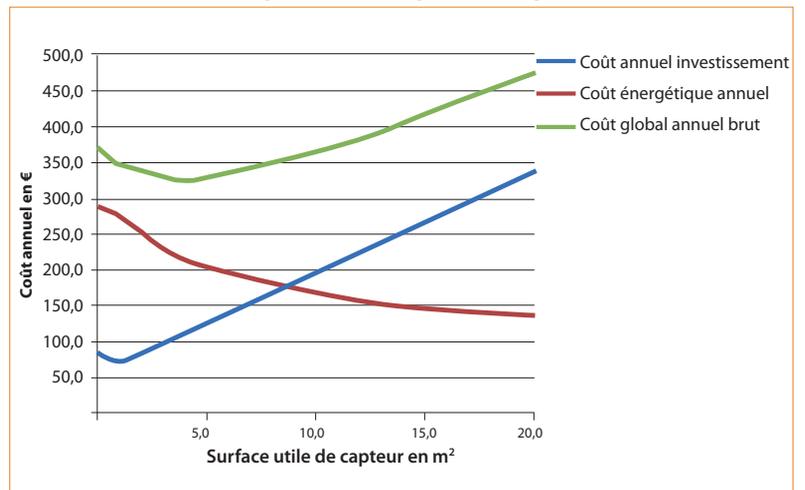
Cellule et module

Vient enfin le moment d'aborder le principe de l'effet photovoltaïque et de préciser l'origine de cette génération de courant électrique qui, rappelons-le, n'est pas le fruit de la mise en œuvre de machines électriques. Sans entrer dans des considérations très poussées sur la physique des semi-conducteurs, nous présentons les phénomènes mis en œuvre en présentant la caractéristique d'une photodiode 23 – obtenue avec le logiciel de dimensionnement PVsyst – , qui nous servira à analyser le comportement d'une cellule tout au long de notre développement.

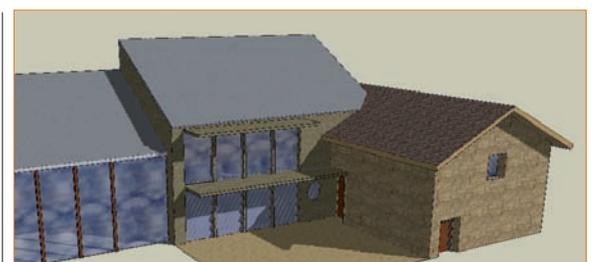
Les stagiaires découvrent ensuite que le comportement électrique d'une cellule évolue selon différents paramètres, notamment l'intensité du rayonnement solaire et la température. Cela peut être constaté facilement, dans un premier temps, grâce à PVsyst, qui autorise de nombreuses variations de paramètres sur les cellules de son choix.



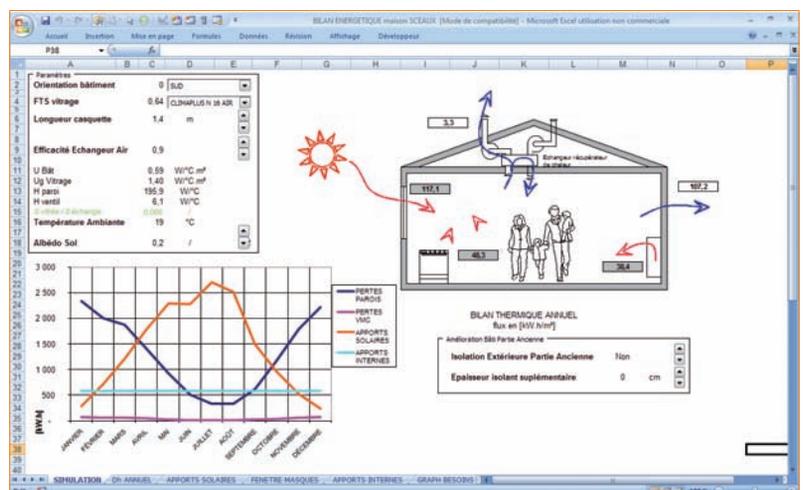
18 Les influences de la superficie d'un capteur sur la productivité



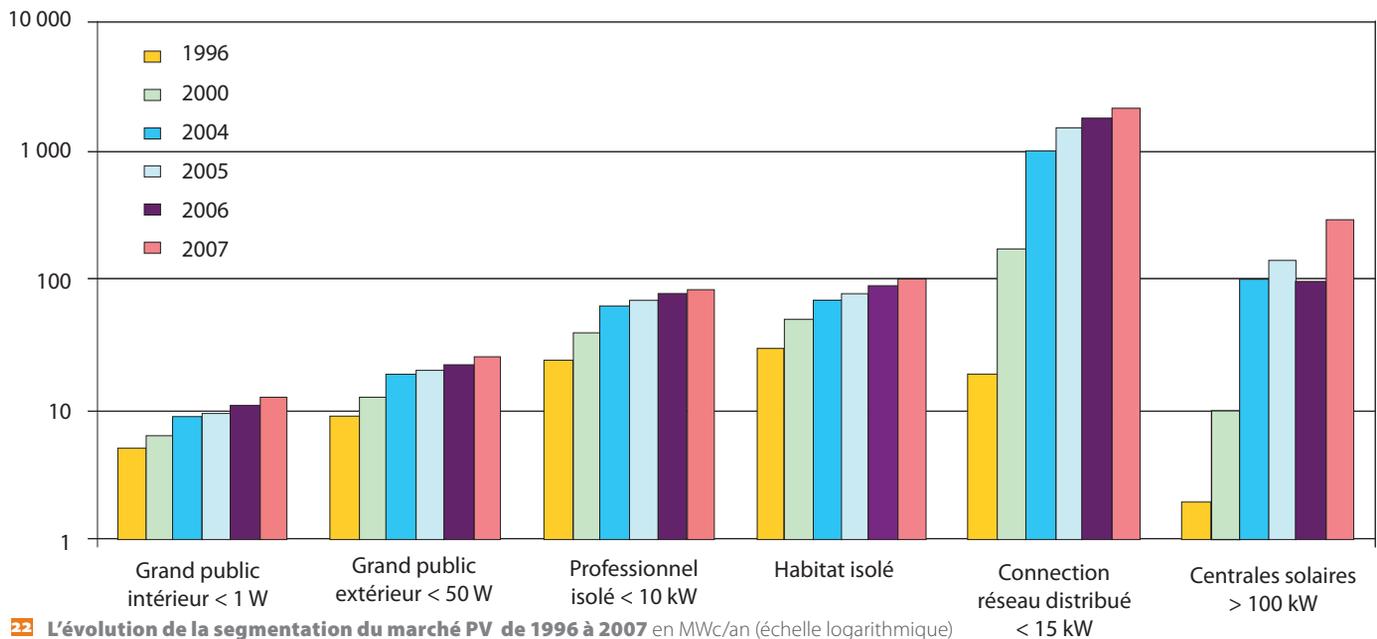
19 La détermination de la surface d'un capteur associé à son coût



20 La modélisation de la maison de Sceaux avec SketchUp



21 La simulation du bilan thermique annuel dans CalSol



22 L'évolution de la segmentation du marché PV de 1996 à 2007 en MWc/an (échelle logarithmique)

Il est aussi possible, avec ce même outil, de faire le lien entre les caractéristiques $I = f(U)$ et $P = f(U)$ d'une cellule et celles d'un module (association série et parallèle de cellules), mais aussi entre les données fournies par le constructeur sur la fiche signalétique du module (conditions normalisées d'essai, dites STC) et les points caractéristiques des courbes obtenues : courant de court-circuit (I_{cc}), tension à vide (U_{co}), point de puissance maximale (PPM), coefficients de température...

L'association d'un module et d'une charge

Le point de fonctionnement se trouve à l'intersection de la courbe du récepteur et de celle du module, pour un ensoleillement et une température donnés. La charge est dite adaptée si elle permet d'être au PPM. On donne comme exemples de charges naturellement bien adaptées la pompe centrifuge, la batterie, l'électrolyse... Si l'ensoleillement, la température ou même les propriétés du module (vieillesse) varient, la charge peut ne plus être adaptée. Il est alors judicieux de placer un convertisseur d'électronique de puissance (hacheur) assurant une extraction de la puissance maximale quelles que soient les conditions de fonctionnement 24. Par l'optimisation de ce transfert d'énergie électrique, on évite le surdimensionnement du champ PV en maximisant le rendement de l'ensemble.

La mise en œuvre de cellules et de modules

Une fois ces connaissances acquises, les stagiaires sont invités à mettre en œuvre les modules à disposition en extérieur au lycée Viollet-le-Duc :

Module monocristallin de 110 Wc

Modules polycristallins de 55 Wc, de 85 Wc (sur site isolé, de fabrication « maison ») et de 130 Wc (sur système en site isolé H2O)

Maquettes pédagogiques Jeulin comprenant chacune :

– 1 photopile Solems de 14 éléments a-Si:H reliés en série sur le même substrat : $V_{max} \approx 10$ V, $I_{max} \approx 1,25$ mA, $P_{max} = 0,0125$ W

– 4 photopiles identiques polycristallines ($P_{max} = 0,25$ W)

L'objectif est de retrouver les caractéristiques et les évolutions évoquées précédemment :

$I = f(V)$ à T (°C) et G (W/m^2) constantes

$P = f(V)$ à T (°C) et G (W/m^2) constantes

Les points I_{cc} , V_{co} , V_{ppm} , I_{ppm} , PPM sur les courbes

L'influence de l'inclinaison : $P/PPMp = f(\text{inclinaison})$;

$P/PPMp = f(\text{surface normale au soleil touchée par le rayonnement direct})$. .

L'influence de l'orientation

L'obtention / la validation des coefficients de température :

a (mA/°C), b (mV/°C) et c (%/°C)

On s'attachera également à :

– effectuer des associations série-parallèle de cellules (mesures de V_{co} et I_{cc}) ;

– comparer les caractéristiques obtenues avec les documentations des constructeurs ou des modèles fins (logiciel PVSyst à disposition) ;

– comparer le comportement des cellules à la lumière artificielle (salle) et à la lumière naturelle (cour), selon l'inclinaison et l'orientation, les ombrages... ;

– définir les ratios puissance/surface pour chaque technologie.

Les mesures effectuées en extérieur permettent de bien ancrer les apprentissages et d'appréhender au mieux les effets de l'inclinaison et de l'orientation du champ (intensité du rayonnement), du mode de pose (refroidissement) et de l'ombrage des cellules.

Les relevés effectués précisent les valeurs de courant et tension fournies par le capteur photovoltaïque en fonction de l'éclairement 25.

La production en site isolé

La fonction des différents constituants d'une installation de production d'énergie électrique autonome est décrite :

● **La batterie d'accumulateurs : stocker l'énergie.**

L'intermittence de la ressource et le déphasage avec les besoins rendent nécessaire l'utilisation d'une batterie

d'accumulateurs, pour consommer en dehors des heures de production. Les accumulateurs doivent être résistants aux cycles répétés et avoir un bon rendement de charge même pour des courants faibles.

● **Le régulateur : réguler la charge/décharge de l'accumulateur.** Véritable nœud du système, il contrôle les flux d'énergie entre modules, accumulateur et récepteurs.

● **L'onduleur : convertir en alternatif.** L'utilisation d'un onduleur autorisera un choix plus large de récepteurs au prix du rendement de ce convertisseur.

La démarche simplifiée de dimensionnement

On assimile ici l'irradiation journalière (Wh/m²/j) à *n* heures d'ensoleillement de 1 000 W/m² sur une journée 26. Une démarche plus fine de dimensionnement est toutefois proposée aux stagiaires dans un exercice de dimensionnement de l'installation PV associée à la serre horticole du projet de rénovation de la maison de Sceaux. Cette méthode itérative d'optimisation est exposée dans l'ouvrage *Énergie solaire photovoltaïque : Le manuel du professionnel* (A. Labouret et M. Viloz, éd. Dunod).

La production raccordée au réseau

Les différentes fonctions que doit assurer l'installation PV – ainsi que les conditions d'installation des générateurs PV (canalisations, matériels, appareillage) – sont présentées aux stagiaires en s'appuyant sur le guide pratique UTE C15-712 (février 2008) 27 :

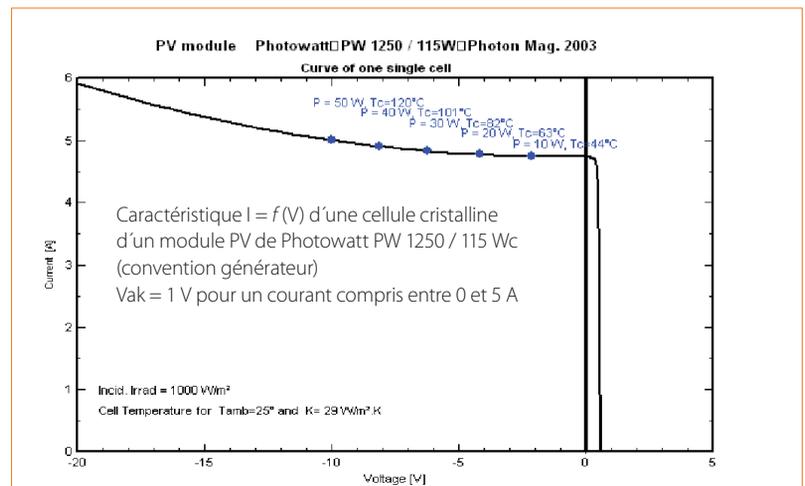
- Protéger contre les chocs électriques, les surintensités, les surtensions d'origine atmosphérique ou dues à des manœuvres.
- Limiter les chutes de tension.
- Isoler l'installation.

Attardons-nous sur les fonctions réalisées par l'onduleur, véritable cerveau de ce type d'installation :

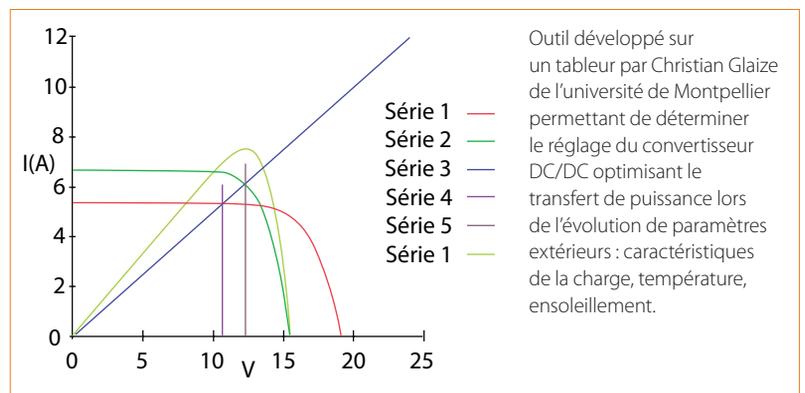
- Rechercher le point de puissance maximal côté DC par optimisation à chaque instant du produit (U · I) sur la caractéristique du champ PV (adaptation d'impédance).
- Convertir l'énergie électrique (DC/AC) avec pilotage de l'onduleur par le réseau.
- Gérer les arrêts et démarrages et optimiser le rendement de la production.
- Se (dé)coupler, se synchroniser et respecter les contraintes de la tension réseau côté AC.
- Protéger les biens et les personnes.
- Communiquer et permettre le suivi de la production.

Nous présentons ensuite les principales associations de modules avec le ou les onduleurs rencontrés dans les installations :

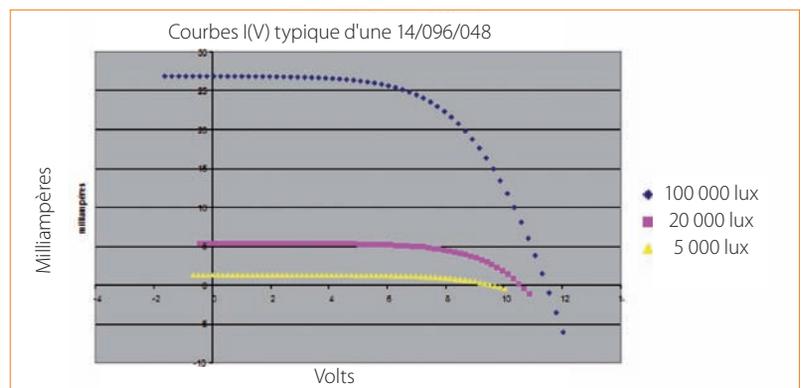
- Onduleur centralisé (1 onduleur pour l'installation)
- Onduleur modulaire (ou « chaîne ») : 1 onduleur par chaîne de 10 à 20 modules
- Onduleur multichaîne (combinaison des deux précédents) : 1 onduleur



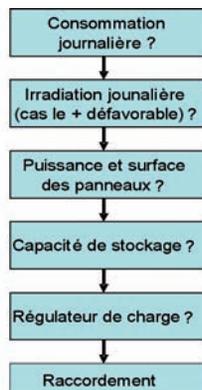
23 Modèle simplifié de la cellule photovoltaïque cristalline



24 Le principe de l'adaptation entre la caractéristique I = f(U) du module et celle de la charge



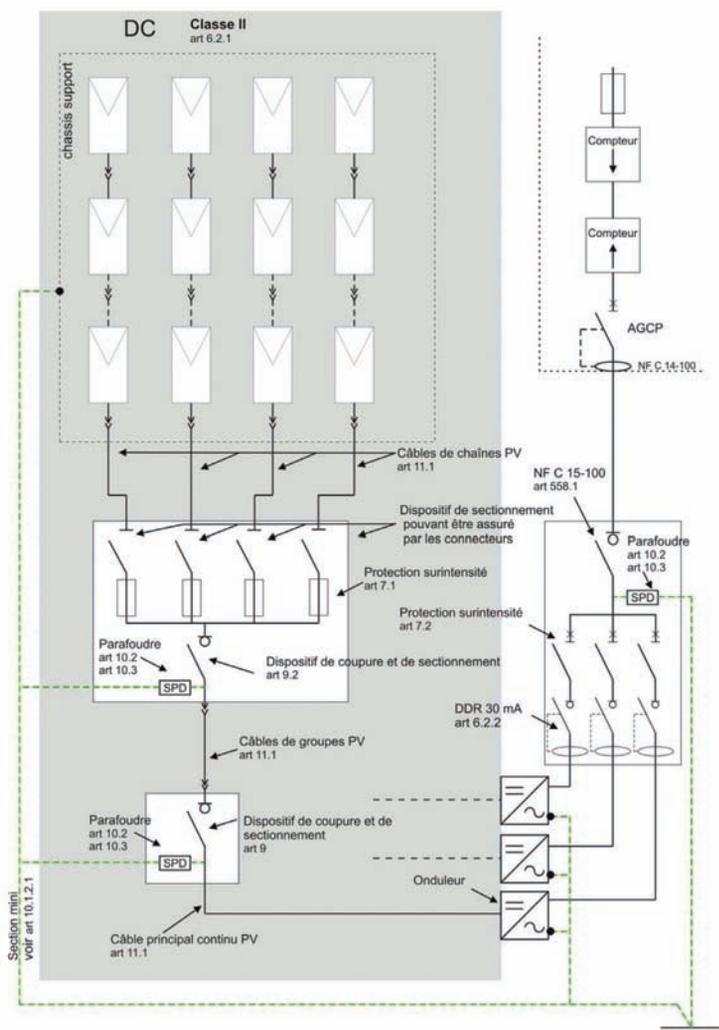
25 Le relevé des mesures effectuées en extérieur



26 Le processus de dimensionnement d'une installation PV en site autonome

côté réseau et plusieurs modules CC (suivis du PPM) côté modules (1 par chaîne), le tout dans un même boîtier
 Onduleur unitaire : un onduleur par module
 Onduleur modulaire sans suivi du PPM : chaque module est équipé d'un boîtier DC/DC de RPPM ; les sorties DC sont ensuite regroupées en amont de l'onduleur (DC/AC) 28

Citons enfin une des meilleures applications fournies par les constructeurs de ces constituants, Sunny Design de SMA, permettant de définir le ou les onduleurs de la marque en fonction de la typologie et du cahier des charges souhaités.



27 Le schéma de principe d'une installation PV

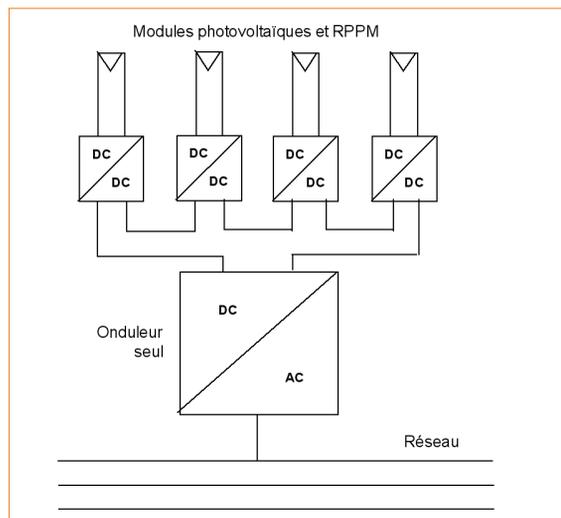


28 Les résultats de la simulation du projet avec Archelios

Le dimensionnement et la conduite de projet

Nous commençons par présenter la méthode d'« avant-projet sommaire » (APS) ou de faisabilité développée par l'Ademe dans ses ouvrages *Systèmes photovoltaïques connectés au réseau : Guide de rédaction du cahier des charges techniques de consultation à destination des maîtres d'ouvrage* (novembre 2007) et *Guide d'aide au montage de projets photovoltaïques portés par les entreprises et les exploitants agricoles* (avril 2010).

Nous l'appliquons ensuite au toit de la maison de Sceaux (calcul de productible annuel). L'objectif est de réaliser une occupation photovoltaïque quasi totale de la couverture



28 Un onduleur modulaire sans suivi de P_{max} (reporté sur chaque module) permet d'optimiser la production

au détriment du solaire thermique afin d'obtenir une construction à énergie positive.

Les principaux résultats obtenus par modélisation thermique concernant la maison donnent :

- Besoins en chaleur : $\approx 40 \text{ kWh/m}^2$ et par an
- Besoins en énergie électrique pour le chauffage de la maison : $\approx 11,5 \text{ kWh/m}^2$, soit $\approx 1 670 \text{ kWh}$ (COP de la PAC à 3,5 en moyenne)
- Besoins en énergie électrique pour la production d'ECS (thermique PAC) : $\approx 877 \text{ kWh}$ (selon SimSol ; COP moyen équivalent de la PAC de 2,2)

Par ailleurs, on sait que la consommation moyenne annuelle d'un foyer français (hors chaleur) est de 2 500 kWh, ce qui nous donne un total d'environ 5 050 kWh pour les besoins en énergie électrique à compenser si l'on veut atteindre l'objectif fixé.

Données techniques

- Surface du toit = $8,9 \times 5,5 = 48,95 \text{ m}^2$
- Inclinaison : 30°
- Orientation : 17° ouest par rapport au sud
- Léger ombrage (toit + cheminée), négligé car plein est

Les modules sont de technologie silicium polycristallin avec intégration en toiture de type synergique (Schüco), non ventilés.

Les résultats obtenus en utilisant la méthode de l'Ademe, basée sur le disque solaire et sur des ratios issus de retours d'expériences de 2007, donnent :

- Irradiation de référence : $G_{ref} = 1 001 \text{ kWh/m}^2$ par an
- Facteur de transposition : $FT = 1,06$ (d'après le disque solaire)
- Irradiation sur le plan des modules : $G = G_{ref} \cdot FT = 1 001 \times 1,06 = 1 061 \text{ kWh/m}^2$ par an
- Rendement global de l'installation : $\eta_{global} = FO \cdot CS = 1 \times 0,0805 = 0,0805$
- Productible : $E_{pv} = G \cdot S_{pv} \cdot \eta_{global} = 1 061 \times 49 \times 0,0805 = 4,18 \text{ MWh}$ par an
- Coût de l'intégration en toiture : 6 € HT/Wc

Le logiciel Archelios de Cythelia, qui utilise un modèle plus fin, donne des résultats un peu plus optimistes, mais encore deçà de ceux attendus, avec 4 873 kWh de productible annuel 28. Ils sont néanmoins proches du besoin énoncé : la maison est plutôt passive que positive. Comme

on peut le voir sur l'écran , le logiciel permet également, après leur détermination, de prendre en compte les paramètres financiers du projet ; on prendra cependant ses « résultats économiques » avec une certaine prudence, compte tenu du fait que cette technologie est récente et qu'elle est encore dans une phase balbutiante quant aux retours sur investissements.

L'intérêt de l'outil informatique réside évidemment dans la possibilité de faire varier les paramètres d'entrée – situation géographique, emplacement, ondulateur, calepinage, inclinaison, orientation... – pour observer l'évolution des résultats.

Le solaire passif et les architectures bioclimatiques

L'étude de cas réalisée sur la maison de Sceaux dès le début de ce stage s'est révélée assez difficile pour les stagiaires, et en particulier pour ce qui est de la justification des différentes étapes de calcul permettant d'aboutir aux besoins énergétiques en chauffage. Le temps du stage, trop court, et l'investissement associé, trop important, rendait cette partie quelque peu rebutante pour les collègues, en majorité issus de la filière électrotechnique.

Mais on ne peut faire l'impasse, lorsque l'on parle d'énergie solaire et d'habitat, sur la notion de solaire passif. En effet, tout bâtiment est un capteur solaire de par la présence de vitrages ! Aussi, après avoir intégré au stage une présentation d'un outil libre de simulation dynamique du bâtiment, le logiciel Codyba, nous avons développé une partie conception bioclimatique de l'habitat permettant de faire passer les concepts d'une bonne architecture solaire passive.

La dimension pédagogique

Nous venons de voir, au cours de ce bref aperçu, ce que pouvait être un stage de formation des collègues de STI dans le domaine de l'énergie solaire, son organisation et les contenus abordés. Il est évident que tout cela est perfectible et mériterait une encore plus grande homogénéité (présentation, intervention de formateurs de disciplines différentes...) et des développements supplémentaires. L'idée est de proposer la découverte d'un domaine en plein développement et d'inciter les professeurs à creuser telle ou telle piste afin de développer leurs propres exploitations pédagogiques.

À ce propos, signalons que le domaine de l'énergie solaire cumule les avantages d'un point de vue pédagogique :

- **La découverte de la problématique** de la production/consommation de l'énergie et de l'impact de nos modes de vie sur l'environnement
- **Le travail d'enseignants de disciplines différentes** (STI, physique appliquée, mathématiques...) sur une même installation ou un même support
- **Le proximité physique des élèves avec le système technique**, puisque bon nombre d'installations solaires commencent à intégrer leur quotidien

- **L'utilisation d'outils de modélisation** accessibles (logiciels de calcul numérique ou spécialisés), conjointement aux essais sur des supports matériels, permettant de faire comprendre aux élèves l'influence des différents paramètres entrant en jeu dans une installation et facilitant la confrontation entre le modèle et la réalité

- **Une ouverture facile vers la réalisation** de projets (conception et réalisation) dans les lycées

Gageons que cela incitera les collègues à se pencher, si ce n'est déjà fait, sur ce vaste et passionnant sujet, qui prend une place importante dans le contexte énergétique actuel et s'intègre parfaitement dans la réforme en cours de la filière STI.

L'exploitation d'un même support regroupant les différentes technologies solaires, comme la maison de Sceaux, apporte une cohérence dans leur présentation, montre leur complémentarité pour atteindre les objectifs fixés par les réglementations thermiques à venir, et facilite le travail des formateurs de disciplines différentes intervenant en des lieux différents. Cela n'empêche pas la réalisation d'expérimentations ou d'études sur des installations strictement thermiques ou photovoltaïques, comme celles que les stagiaires découvrent et étudient en complément de la maison de Sceaux :

- **Une maison à structure bois** implantée dans la région d'Avignon, d'une surface habitable de 110 m², d'architecture parallélépipédique et qui affiche le label BBC (extrait de la revue *La Maison positive*). Cette maison est très largement vitrée côté sud et dispose d'une serre bioclimatique permettant en hiver le réchauffage de l'air hygiénique. L'appoint en chauffage est réalisé par un poêle à bois. La production d'ECS est réalisée grâce à un CESI à appoint électrique. Enfin, une toiture photovoltaïque raccordée au réseau permet de couvrir les besoins en électricité de la maison.

Une étude thermique réalisée avec le logiciel Codyba nous permet d'observer différents scénarios, et en particulier de valider, moyennant quelques aménagements, le label BBC de ce type d'architecture en région parisienne avec une consommation énergétique annuelle estimée environ 32 kWh/m² pour le chauffage et la production d'ECS.

- **Une centrale de production photovoltaïque** raccordée au réseau et implantée depuis 2006 sur la façade de l'hôtel Ibis, porte de Clichy, au bord du périphérique parisien. La mise à disposition des données de production par l'hôtelier enrichit l'exploitation pédagogique de ce support (comparaison

► Pour aller plus loin

L'ensemble des ressources et des applications proposées lors du stage est disponible sur le site suivant :

www.lyc-violetteduc.ac-versailles.fr/spip/spip.php?rubrique104