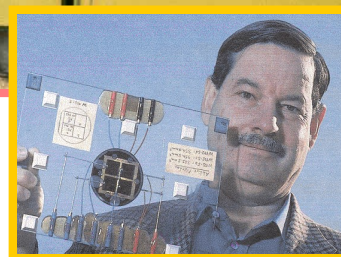
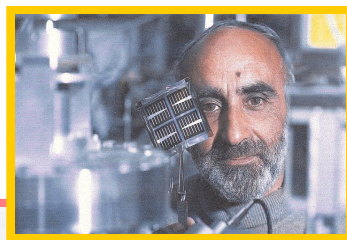


2 juin 1999

# PROMONT - SOLEIL

## RAPPORT FINAL



**Société Mont-Soleil**  
c/o BKW FMB Energie SA  
Viktoriaplatz 2  
3000 Berne 25  
Tél: 031 330 51 51  
Fax: 031 330 51 09

**R. Minder - J. Vollenweider**

## **1. PROJET PROMONT-SOLEIL**

Le projet PROMONT-SOLEIL, lancé en 1998, a ouvert de nouvelles voies pour le développement de l'énergie solaire en Suisse. Il a donné aux personnes, familles, entreprises, organisations, communes et cantons sensibilisés aux questions liées à l'énergie et à l'environnement la possibilité inédite de choisir eux-mêmes un programme d'essai concret de développement photovoltaïque, d'y participer et de recevoir en premier toutes les informations spécifiques relatives au projet. Font partie du projet PROMONT-SOLEIL les deux sous-projets TEST 98-99 DE CELLULES PROTOTYPES et TEST 98-99 DE TOITURE SOLAIRE.

Madame Elisabeth Zölch, directrice de l'économie publique du canton de Berne, a exprimé son soutien au projet de la manière suivante: „L'initiative privée prend une part de plus en plus importante dans la recherche et le développement des nouvelles technologies. La Confédération et les cantons doivent concentrer leurs moyens restreints pour soutenir la recherche fondamentale. C'est surtout dans le domaine de l'énergie que l'on trouve de nombreuses possibilités d'amener les nouveaux développements suisses à leur commercialisation, ceci sur la base d'initiatives privées et dans l'intérêt de l'économie, de l'environnement et des emplois. C'est sur cela que se base le projet PROMONT-SOLEIL. C'est pourquoi il mérite votre soutien.“

## **2. UN SOUTIEN EFFECTIF**

La réalisation du projet PROMONT-SOLEIL a été possible grâce au soutien de 108 personnes et entreprises, soutien qui s'est chiffré à 41'962,50 CHF.

Montants de 1000 CHF et plus:

- pour le TEST 98-99 DE CELLULES PROTOTYPES: Schnyder & Cie SA, Bévillard; Willi M. Scherer, Zollikofen; Konrad Eugster-Chopard, Bremgarten/Berne; BKW FMB Energie SA, Berne; Elektrowatt AG, Zurich, Services industriels de la ville de Bâle, Bâle; Service d'électricité de la ville de Berne, Berne; Jakob Vollenweider, Spiegel/Berne; Ruedi Steuri, Glis; Rebekka Grandi, Altreu.
- pour le TEST 98-99 DE TOITURE SOLAIRE: WIBA Kunststoff AG, Konolfingen; Hans Wanner, Evillard; Services Industriels, Delémont; Energie Ouest Suisse, Lausanne; BKW FMB Energie SA, Berne; Elektrowatt AG, Zurich; Services industriels de la ville de Bâle, Bâle; AEK Energie AG, Solothurn.

Un grand merci à tous pour ce précieux soutien!

### 3. TEST 98-99 DE CELLULES PROTOTYPES

#### 3.1 Description du projet et objectifs

Les travaux de recherche effectués jusqu'ici au centre d'essai Mont-Soleil et soutenus par l'Office fédéral de l'énergie comprennent des études et des essais sur des modules solaires de *prototypes à un stade proche de la production* ou sur des premières séries de production.

En complément à ces travaux et toujours dans le cadre du projet PROMONT-SOLEIL, des *prototypes de cellules et de modules prêts au laboratoire* et ayant de bonnes perspectives de succès pour une production de masse ultérieure ont été testés.

De nos jours, de telles cellules sont mesurées dans des laboratoires spécialisés (p. ex. Fraunhofer Institut, Freiburg i.B. ou NREL, USA). Il existe toutefois peu de données de mesure de bancs d'essai en plein air et effectuées dans des conditions réelles. Les travaux réalisés au centre d'essai Mont-Soleil contribuent concrètement à l'évaluation de cellules et modules nouveaux.

Les échantillons-test sont bien plus petits que les modules utilisés jusqu'ici, leur surface allant de 1 à env. 100 cm<sup>2</sup>. La puissance ainsi atteinte est d'env. 10 milliwatts jusqu'à quelques watts au maximum.

L'objectif du projet est de mesurer et d'évaluer les paramètres électriques les plus importants des cellules à tester, et cela dans des conditions météorologiques réelles. Il sera ainsi possible de tirer de premières conclusions concernant les possibilités d'application des différentes technologies.

#### 3.2 Choix des cellules prototypes

Pour le projet, les cellules solaires suivantes ont été mises à disposition par différents laboratoires:

*Institut Paul Scherrer (IPS), Villigen (Dr W. Durisch, Dr J. Gobrecht):*

Cellules de silicium monocristallin en couche mince avec une capture de rayonnement améliorée (light trapping) d'après les travaux de recherche de l'IPS.

*EPF-Lausanne (Prof. Dr M. Grätzel):*

Cellules de couleur organique, constituées d'électrolyte liquide à colorants et couches TiO<sub>2</sub>.

*Université de Neuchâtel (Prof. Dr A. Shah):*

a) Cellules tandem „micromorphes“ (silicium amorphe et monocristallin), b) Cellules de silicium amorphe.

*Astropower, USA:*

Cellule à film de silicium, une cellule polycristalline spéciale pouvant être fabriquée à partir de matières premières peu onéreuses.

### 3.3 Modèle et dispositifs de mesure pour les tests des cellules prototypes

Les dispositifs de mesure comprennent les appareils suivants:

Saisie des données: enregistreur de données du type IMC  $\mu$ Music avec 32 entrées analogiques, configuration et transmission des données sur ordinateur bloc-notes.

Electronique de mesure: électronique spécialement conçue pour mesurer les paramètres de cellules et petits modules.

Principe de mesure: exploration continue de la courbe caractéristique I-U, mesure simultanée du rayonnement et de la température. Déclenchement manuel des opérations de mesure. Calcul des paramètres des cellules et du rendement, facteur de remplissage, etc., d'après les valeurs de mesure de la courbe caractéristique.

Le dispositif de mesure complet ainsi que les cellules sont montés sur un appareillage mobile. Celui-ci est entreposé - quand aucune mesure n'est effectuée - dans le pavillon et accessible aux visiteurs. Les cellules sont protégées par un film transparent qui est enlevé lors des périodes de mesure. Le dispositif de mesure est représenté dans la figure 3.1.

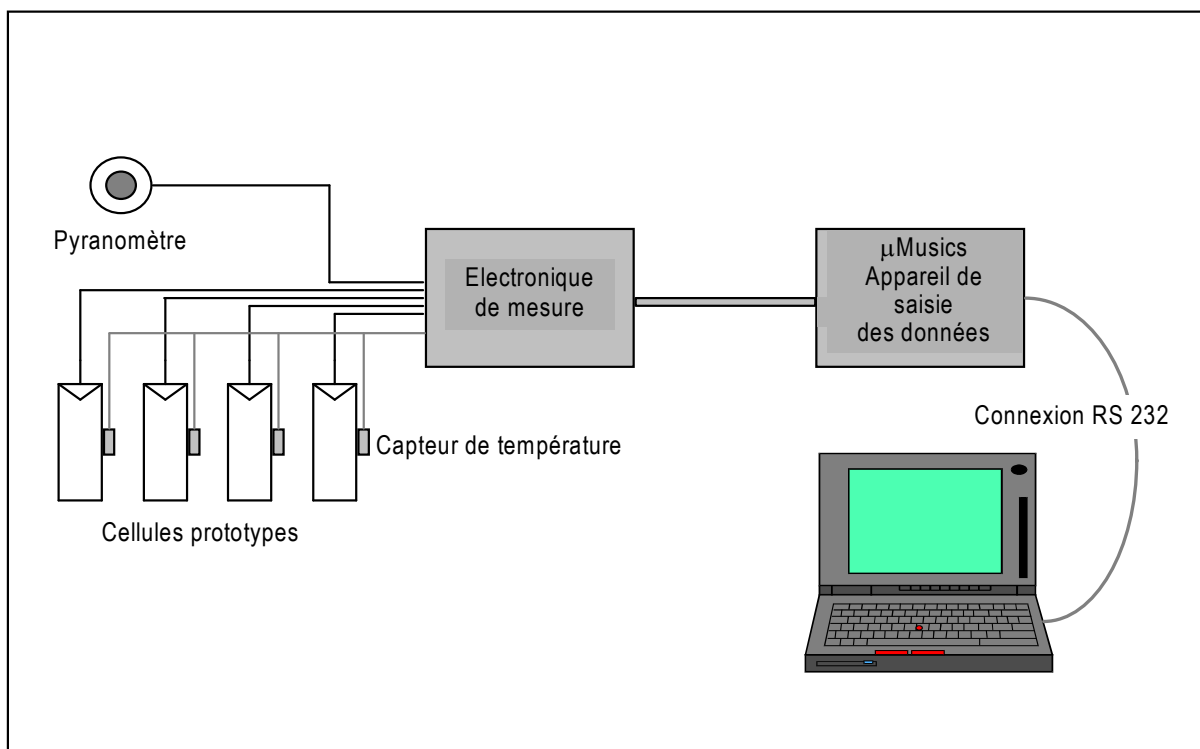


Figure 3.1: Schéma de connexion du dispositif de mesure

### 3.4 Résultats du test des cellules prototypes

Suite à des difficultés imprévues lors de la fabrication des cellules prototypes, le programme de mesure n'a pu commencer qu'en mars 1999. Les résultats sont donc présentés pour une période limitée et il n'est pas possible de se prononcer sur d'éventuels effets de dégradation. Les tableaux suivants montrent quelques courbes graphiques représentant les caractéristiques électriques des différentes cellules.

Le courant photoélectrique indique la tension des cellules.

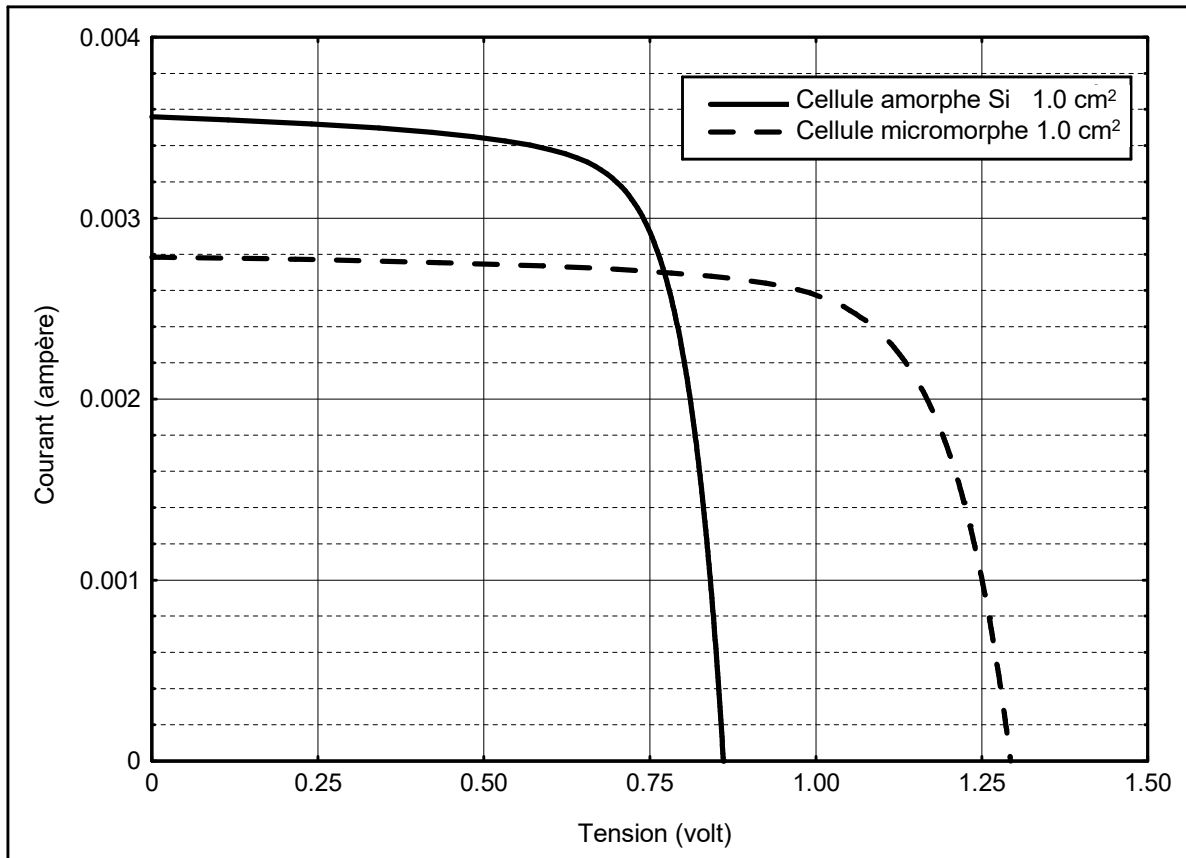


Figure 3.2: Courbe caractéristique des cellules amorphes et micromorphes de l'Université de Neuchâtel, mesurée lors d'un rayonnement d'env. 200 W/m<sup>2</sup>.

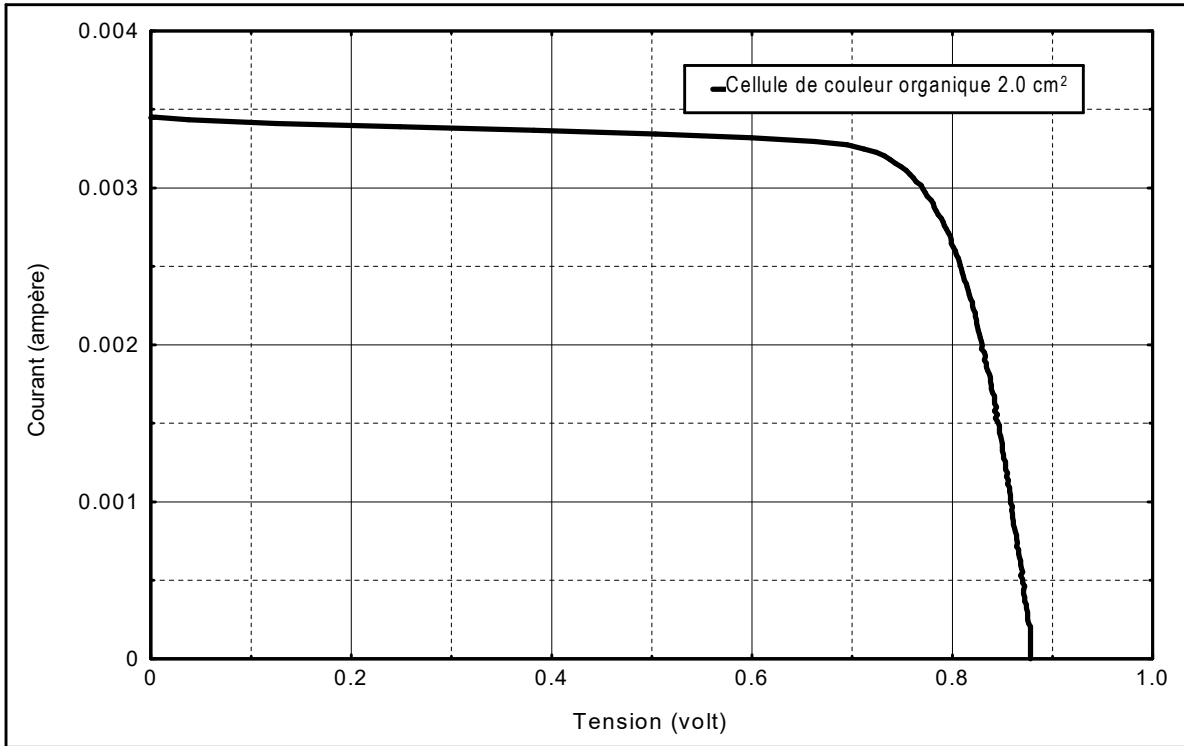


Figure 3.3: Courbe caractéristique de la cellule à couleur organique de l'EPFL, mesurée lors d'un rayonnement d'env.  $200 \text{ W/m}^2$ .

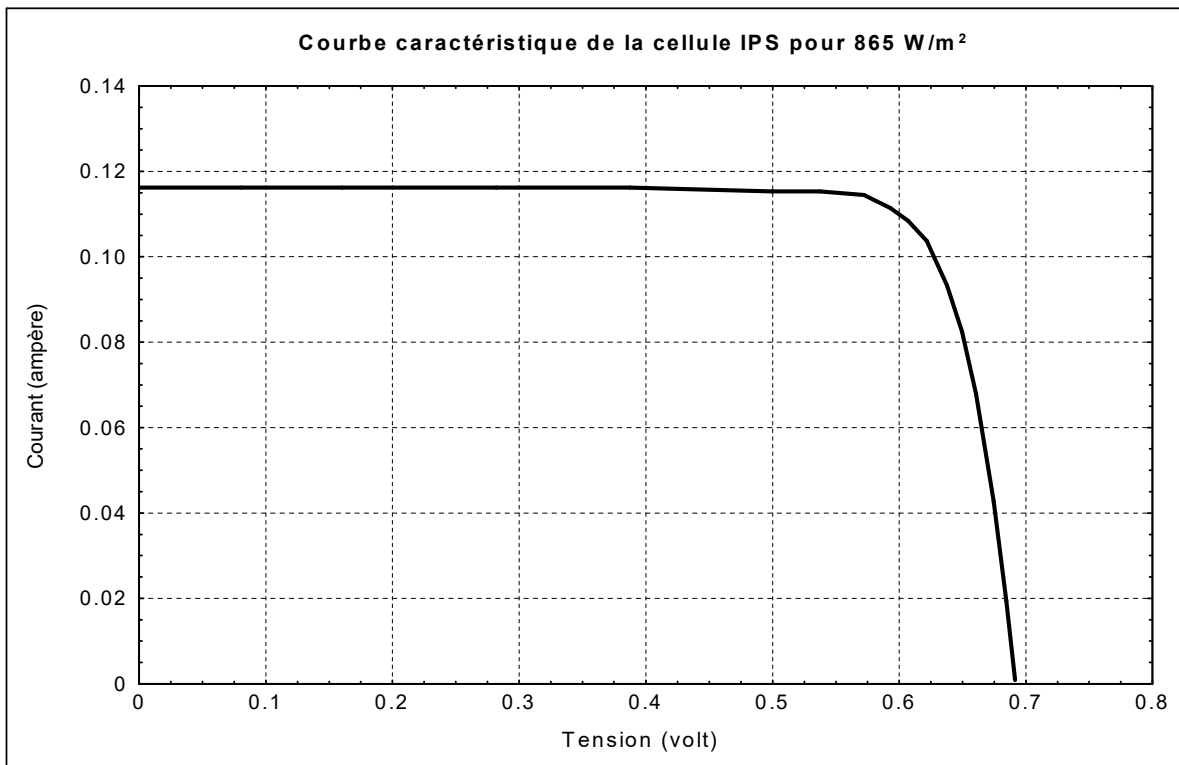


Figure 3.4: Courbe caractéristique de la cellule en silicium monocristallin de l'IPS, mesurée lors d'un rayonnement d'env.  $865 \text{ W/m}^2$ .

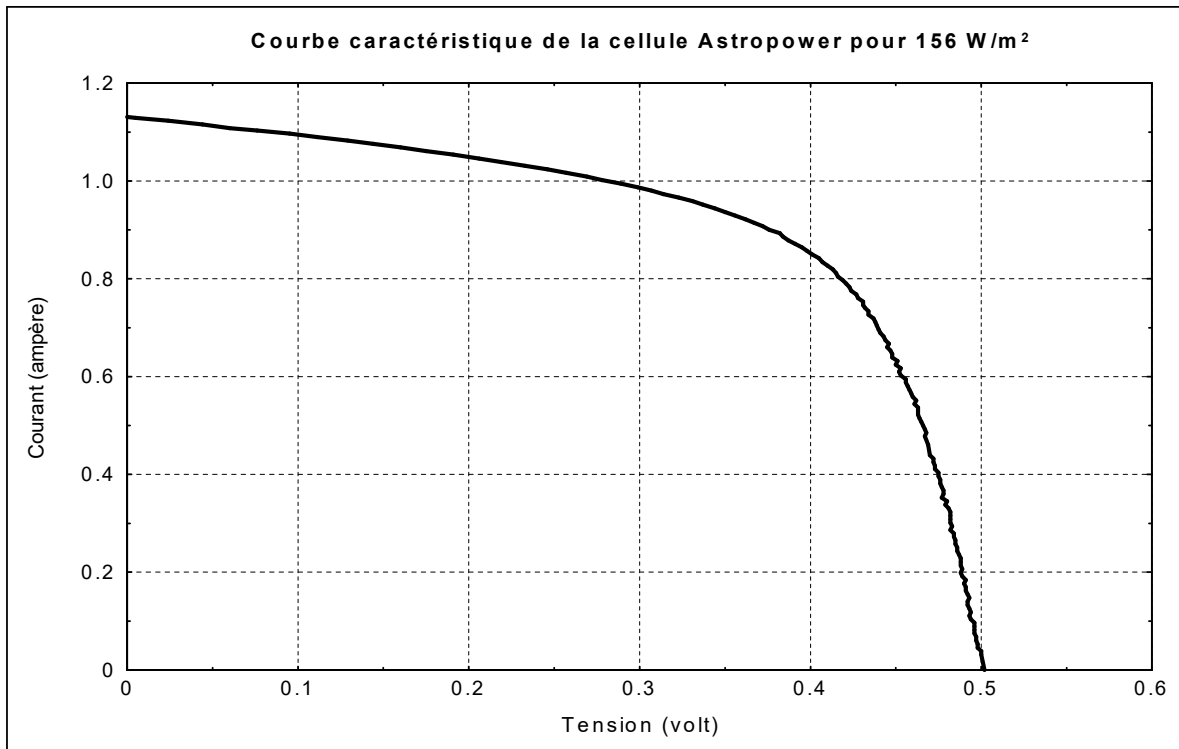


Figure 3.5: Courbe caractéristique de la cellule en silicium polycristallin de la firme Astropower (USA), mesurée lors d'un rayonnement d'env.  $156 \text{ W/m}^2$ .

Malgré des périodes de mesure limitées, les mesures effectuées jusqu'à présent permettent de tirer de premières conclusions. Pour ce qui est des cellules ayant fait l'objet de mesures, il faut toutefois préciser qu'il s'agit de premiers échantillons-test, c'est-à-dire que les résultats ne sont pas encore statistiquement assurés.

En comparant les cellules amorphes et micromorphes de l'Université de Neuchâtel (figure 3.2), on peut constater que la cellule amorphe présente une tension à vide d'env. 0,85 volt et la cellule micromorphe une tension à vide d'env. 1,3 volt. Pour les courants, les données sont pour ainsi dire inversées, la puissance maximale des deux cellules étant donc pratiquement identique. Cela correspond à peu près aux prévisions, étant donné que la cellule amorphe est dotée d'une structure tandem (couplage en série d'une cellule amorphe et d'une cellule microcristalline).

La cellule de couleur organique de l'EPFL (figure 3.3) présente une courbe semblable à celle de la cellule amorphe Si, et cela bien que les surfaces cellulaires soient différentes. Il faut également ajouter que les cellules de couleur organique mesurées étaient exposées à la lumière depuis plus longtemps. Sur la base de mesures effectuées en laboratoire, on s'attend à ce que les nouvelles cellules de couleur organique fournissent un courant photoélectrique nettement plus élevé.

La cellule monocristalline Si, dont la courbe est visible dans la figure 3.4, est à classer dans une catégorie tout à fait différente. Le courant photoélectrique est pratiquement constant sur un long parcours de la tension puis tombe seulement à partir de 0,6 volt. Pour une cellule au silicium, cette cellule présente un facteur de remplissage très important, ce qui indique des pertes internes faibles. Ces bonnes valeurs s'expliquent par la technologie de fabrication, mais aussi par l'utilisation de matière première de qualité élevée et onéreuse.

La cellule polycristalline de la firme Astropower se situe à l'autre extrême des cellules cristallines Si. Cette technologie, qui se base sur une matière première bon marché, présente logiquement une courbe moins idéale, surtout lors d'un rayonnement relativement faible de  $156 \text{ W/m}^2$  tel qu'il est présenté sur la figure 3.5. Dans de telles conditions, la tension à vide est de 0,5 volt. L'arrondi de la courbe est particulièrement intéressant, le courant photoélectrique tombant déjà lors de tensions minimales. Cela indique d'importantes pertes internes (faible résistance shunt de la cellule), qui sont probablement dues à la structure particulière du matériau. Le nombre élevé de petites cristallites engendre de nombreux joints de grain, ce qui a des répercussions négatives sur la qualité de la cellule.

### **3.5 Conclusions et perspectives du test des cellules prototypes**

Les études réalisées dans le cadre du TESTS 98-99 DE CELLULES PROTOTYPES ont abouti à d'intéressants résultats. Toutes les technologies testées ont de grandes chances d'être commercialisées à l'avenir. Les niveaux de développement de chaque cellule en sont encore à différents stades et seront utilisés à l'avenir pour différentes applications.

Les technologies à couche mince développées à l'Université de Neuchâtel et à l'EPF de Lausanne ont, à long terme, un potentiel économique important. Outre la poursuite des recherches dans le domaine des couches minces, des travaux de développement axés sur les différentes applications sont nécessaires. L'agrandissement de la surface des cellules et l'assemblage de modules pluricellulaires sont des objectifs prioritaires.

La cellule IPS pourrait quant à elle rapidement être commercialisée, la technologie du silicium cristallin étant aujourd'hui très bien maîtrisée. Il s'agit encore de savoir s'il est possible de développer des processus de fabrication économiquement intéressants.

La cellule Astropower est déjà fabriquée en série; pour ce qui est du développement, il s'agit en priorité d'axer les efforts sur les améliorations techniques permettant d'optimiser le rendement, en particulier lors d'ensoleillement de faible intensité. Les coûts pourraient ainsi être également réduits.

Les résultats de ce rapport représentent un premier pas important pour la caractérisation de cellules prototypes basée sur la pratique. Etant donné que de



telles mesures se sont révélées être très importantes pour les développeurs de cellules, le projet se poursuivra au-delà des activités Promont-Soleil. Dans le cadre d'un projet de recherche soutenu par le Fonds pour projets et études de l'économie électrique, les mesures de cellules prototypes se poursuivront de manière approfondie et inclueront également de nouveaux développements.

## **4. TEST 98-99 DE TOITURE SOLAIRE**

### **4.1 Description du projet et objectifs**

Dans le cadre du projet PROMONT-SOLEIL, le TEST 98-99 DE TOITURE SOLAIRE complète le TEST 98-99 DE CELLULES PROTOTYPES sur le plan des applications techniques. Le TEST 98-99 DE TOITURE SOLAIRE fournit des données de référence et des analyses à l'intention des maîtres de l'ouvrage, qui constituent des bases décisionnelles objectives en vue du montage d'installations solaires intégrées aux bâtiments.

### **4.2 Choix des éléments de toiture solaire**

Lors du choix des éléments de toiture solaire utilisés pour le pavillon, la Société Mont-Soleil a particulièrement veillé à appliquer des modèles aussi différents que possible, afin de faire ressortir la variété de choix de l'offre actuelle du marché. Il ne s'agit donc - il faut le souligner - pas explicitement d'un concours. Une évaluation globale serait d'ailleurs des plus ardues étant donné qu'il existe, comme il a été relevé plus haut, sensiblement plus de critères que ceux souvent utilisés de rendement et de prix.

*ATLANTIS SUNSLATES<sup>TM</sup>*: ce système de toitures et de façades en schiste solaire est posé sur l'avant-toit gauche et sur la façade du pavillon des visiteurs. Chaque élément est constitué d'une plaque d'éternit de dimensions standards et d'une unité de cellules solaires, fabriquées selon le procédé de l'entreprise bernoise Atlantis. Les cellules solaires sont incorporées dans une matière synthétique, entre un verre spécial trempé sur lequel on peut marcher et une feuille d'aluminium. L'ensemble ainsi réalisé est collé sur les plaques d'éternit. Les éléments Sunslates peuvent être utilisés avec diverses cellules solaires, si bien qu'on peut tenir constamment compte de futures améliorations, tout comme de souhaits de couleurs. Le type de cellules employé en l'occurrence est cristallin et il fournit un rendement de 12%. Un kW<sub>p</sub> exige ainsi une surface de 10 m<sup>2</sup>. Le coût par kW<sub>p</sub> s'élève à Fr. 12'000.-.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Les coûts s'entendent sans onduleur ni installation. Dans les installations d'une certaine importance, les coûts par kW<sub>p</sub> installé diminuent.

**TUILES POUR TOITURE SOLAIRE NEWTEC:** la tuile pour toiture solaire (TTS) de l'entreprise Newtec, dans la Vallée du Rhin, est posée sur l'avant-toit droit du pavillon. La TTS comporte des cellules solaires cristallines Siemens qui sont entourées d'un cadre en matière synthétique, dont la dimension correspond exactement à la surface de quatre tuiles standards et qui sont recouvertes d'un verre frontal, de 4 mm d'épaisseur, sur lequel on peut marcher. Les cellules ont un rendement de 13%. Un kW<sub>p</sub> requiert une surface de 11 m<sup>2</sup> et coûte Fr. 12'000.-.<sup>1</sup>

**UNI-SOLAR PV-SHINGLES:** les bardeaux PV intégrés au milieu de la toiture du pavillon sont fabriqués par l'entreprise américaine Uni-Solar. Il s'agit de cellules triples amorphes, posées sur des surfaces caoutchoutées d'environ 2 m de long. Les bardeaux PV sont conçus pour le marché américain, où des bardeaux d'asphalte étant posés sur de nombreuses maisons aux USA. Le faible rendement de 7%, typique pour des cellules amorphes, implique une surface relativement grande de 16 m<sup>2</sup>, nécessaire à la production de 1 kW<sub>p</sub>. Néanmoins, les coûts sont limités à Fr. 10'000.- pour 1 kW<sub>p</sub>.<sup>1</sup>

#### **4.3 Modèle de mesure et d'évaluation pour le test de toiture solaire**

Les exigences auxquelles une installation solaire intégrée aux bâtiments doit satisfaire sont exactement les mêmes que pour tout autre élément de toiture ou de façade. Elles peuvent donc être simplement déduites des expériences faites:

**Commercialisation:** c'est à l'achat que le client entre pour la première fois en contact avec le produit souhaité. La qualité de la commercialisation sera donc déterminante pour donner entière satisfaction au client.

**Esthétique:** lors du premier coup d'oeil sur le produit, on évalue naturellement la forme et la couleur. Pour l'intégration aux bâtiments, c'est bien entendu un avantage d'avoir le choix entre des produits de dimensions standardisées et de couleurs variées. Toutefois, en ce qui concerne les couleurs des cellules photovoltaïques, il convient de tenir compte du rapport entre la couleur et le rendement. Etant donné que la partie du spectre lumineux qui apparaît comme couleur de la cellule n'est pas absorbée par la cellule elle-même, c'est le bleu foncé typique qui assure le meilleur rendement, alors qu'avec un magenta ou un or, par exemple, la diminution du rendement atteint jusqu'à 25%.

**Prix:** Les prix des éléments photovoltaïques (PV) intégrés aux bâtiments varient entre 8'000 CHF et 12'000 CHF par kW<sub>p</sub>. Ces prix s'entendent sans onduleur ni installation, pour lesquels il faut encore ajouter 50% dans les cas les plus favorables et, dans les cas les plus défavorables - s'il faut par exemple encore modifier l'enveloppe de l'immeuble - jusqu'à 75%.

**Montage:** en premier lieu pour des raisons de coûts, le client désire que les éléments PV puissent être montés sans problèmes. Des économies peuvent encore être réalisées grâce à un rendement élevé des cellules (limitant ainsi la place

nécessaire), à un montage aisé ainsi qu'à des éléments de construction résistants et standardisés, faciles à monter sans autres éléments spéciaux.

*Durabilité:* l'utilisateur attend généralement de l'installation qu'elle dure une trentaine d'années, ce qui met fortement à contribution la capacité de résistance des éléments de construction à l'égard des influences climatiques et environnementales de toute nature.

*Elimination:* la facilité avec laquelle on peut éliminer les moyens de production joue naturellement un rôle particulièrement important pour la crédibilité dans le domaine des énergies dites alternatives.

Les points susmentionnés ont été évalués au moyen de la méthode suivante: la commercialisation, le prix et le montage pour les différents produits ont déjà pu être évalués au cours de la construction de la toiture solaire. L'esthétique a été estimée sur la base de nombreuses appréciations émises par les visiteurs de la centrale solaire. L'évaluation de la durabilité se base sur un programme de mesures en continu élaboré et réalisé par l'Ecole d'ingénieurs de St-Imier. Etant donné que des données pratiques manquent encore, les aspects écologiques de l'élimination ont seulement fait l'objet d'une estimation, cela néanmoins sur la base de nombreuses études théoriques.<sup>2</sup>

#### 4.4 Résultats du test de toiture solaire

*Commercialisation:* l'entreprise Atlantis, qui distribue ses produits de manière très professionnelle, s'est avérée la plus convaincante à cet égard. L'achat et la livraison des bardeaux se sont déroulés rapidement et sans complications. Relevons que ceci ne va pas malheureusement pas de soi, la qualité de la distribution n'étant souvent pas encore considérée comme un critère d'achat au sein de la branche solaire.

*Esthétique:* beaucoup de visiteurs ont placé les bardeaux d'Atlantis en tête du classement en ce qui concerne l'esthétique. Nombre d'entre eux se sont en outre déclarés convaincus par les multiples variantes qu'offrent ces produits.

*Prix:* du point de vue du prix, ce sont les PV-Shingles d'Uni-Solar qui ont obtenu le meilleur résultat avec 10'000 CHF par kW<sub>p</sub>. Les bardeaux d'Atlantis ainsi que les tuiles de toiture solaire Newtec sont environ 20% plus chers.

*Montage:* parmi les trois produits testés, seuls les bardeaux d'Atlantis se sont révélés faciles à monter. Le montage des autres produits a en revanche donné lieu à passablement de difficultés, dues à des instructions de montage compliquées et parfois incorrectes ainsi qu'à la nécessité de procéder à des ajustements qui ont requis toute la capacité d'improvisation de l'équipe de montage.

---

<sup>2</sup> Frischknecht R. et al.: Ökoinventare für Energiesysteme. 3ème édition. Office fédéral de l'énergie (OFEN), Berne 1996.

*Durabilité:* on peut estimer qu'il y a de bonnes chances que les bardeaux d'Atlantis et les tuiles de toiture solaire Newtec puissent être exploitées pendant 30 ans. Ceci n'est malheureusement pas le cas des PV-Shingles d'Uni-Solar. Ceux-ci ont nécessité dès le montage d'importantes adaptations mécaniques afin de pouvoir résister, au moins dans un premier temps, aux rudes conditions climatiques prévalant au Mont-Soleil.

Les résultats des mesures effectuées par l'école d'ingénieurs de St-Imier sont présentés ci-après. Il convient de faire les remarques suivantes au sujet de la nomenclature: 1) Deux produits d'Atlantis ont fait l'objet de mesures: les bardeaux de silicium monocristallin (m-Si) utilisés comme éléments de toiture ainsi que les bardeaux de silicium polycristallin (p-Si) apposés sur la façade. 2) L'élément de façade «AstroPower», qui ne faisait pas partie du test de toiture solaire, a également fait l'objet de mesures à des fins de référence. 3) L'abréviation SHR-17 se réfère aux PV-Shingles d'Uni-Solar.

Les irrégularités dans la succession des dates sont dues aux causes suivantes:

- Les mesures sur les bardeaux p-Si n'ont commencé que le 30.4.98, après la réparation de l'onduleur qui en fait partie.
- Les mesures sur les bardeaux m-Si et sur les tuiles de toiture solaire Newtec ont dû être interrompues du 14.5.98 au 23.6.98, en raison des travaux de transformation effectués sur le toit de pavillon. Dans le cadre de ces travaux, l'inclinaison des deux avant-toits sur lesquels les deux éléments précités étaient montés a été augmentée de 22 à 30 degrés. Ceci a permis d'améliorer la production d'électricité.
- Des pertes de rendement ont été enregistrées au niveau des tuiles de toiture solaire Newtec en raison d'un problème de coffret de distribution. Ce problème n'a pu être résolu que le 30.6.98.

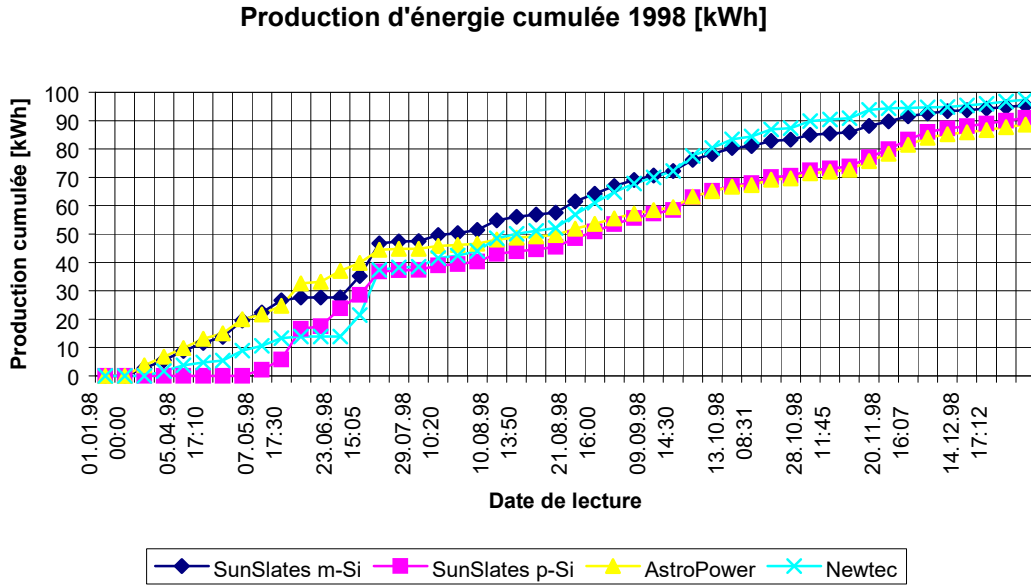


Figure 4.1: Production d'énergie cumulée 1998 (Sunslates et Newtec)

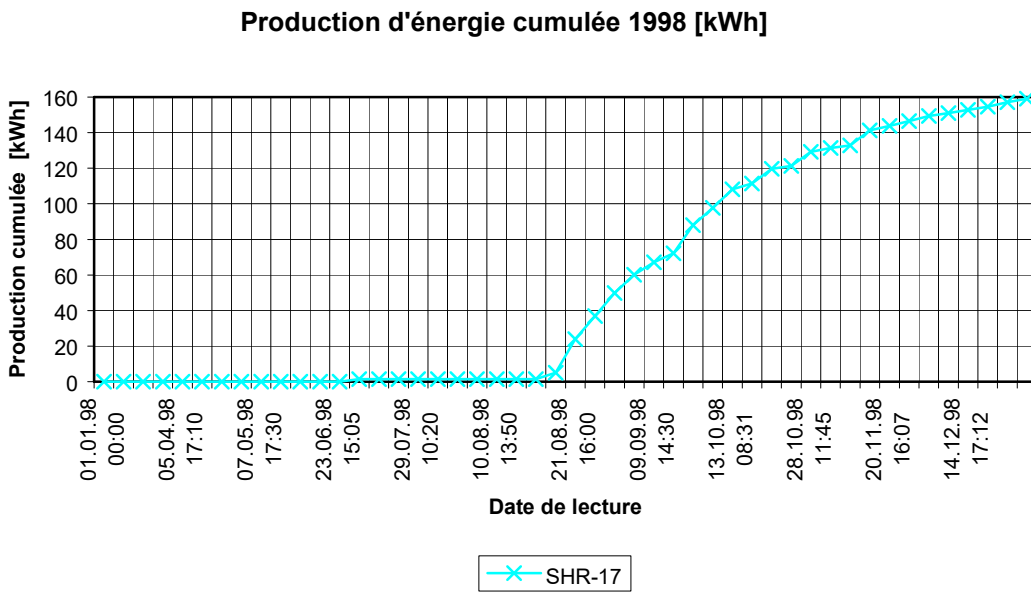


Figure 4.2: Production d'énergie cumulée 1998 (Uni-Solar)

Production d'énergie cumulée 1999 [kWh]

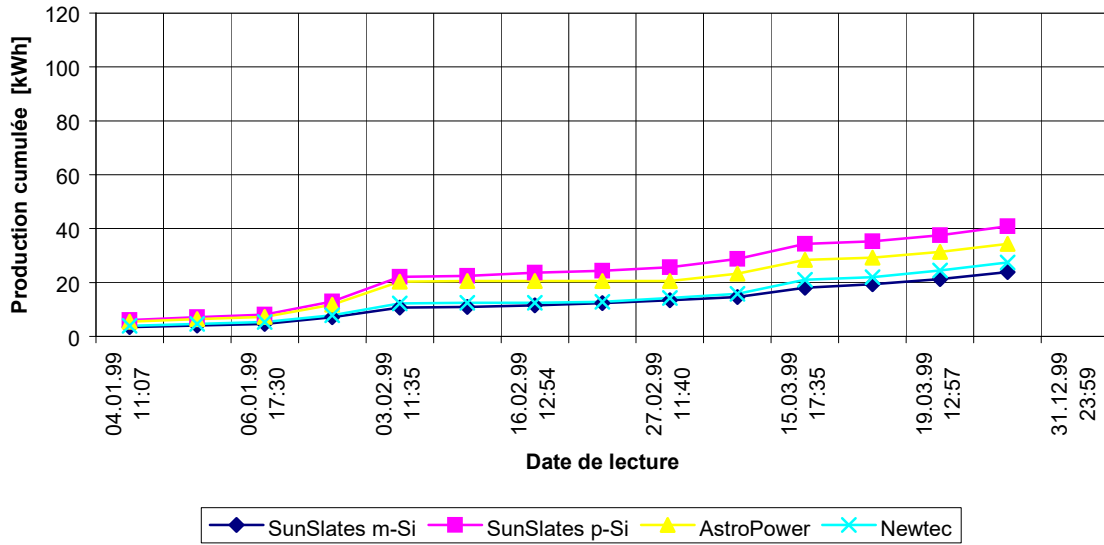


Figure 4.3: Production d'énergie cumulée 1999 (Sunslates et Newtec)

Production d'énergie cumulée 1999 [kWh]

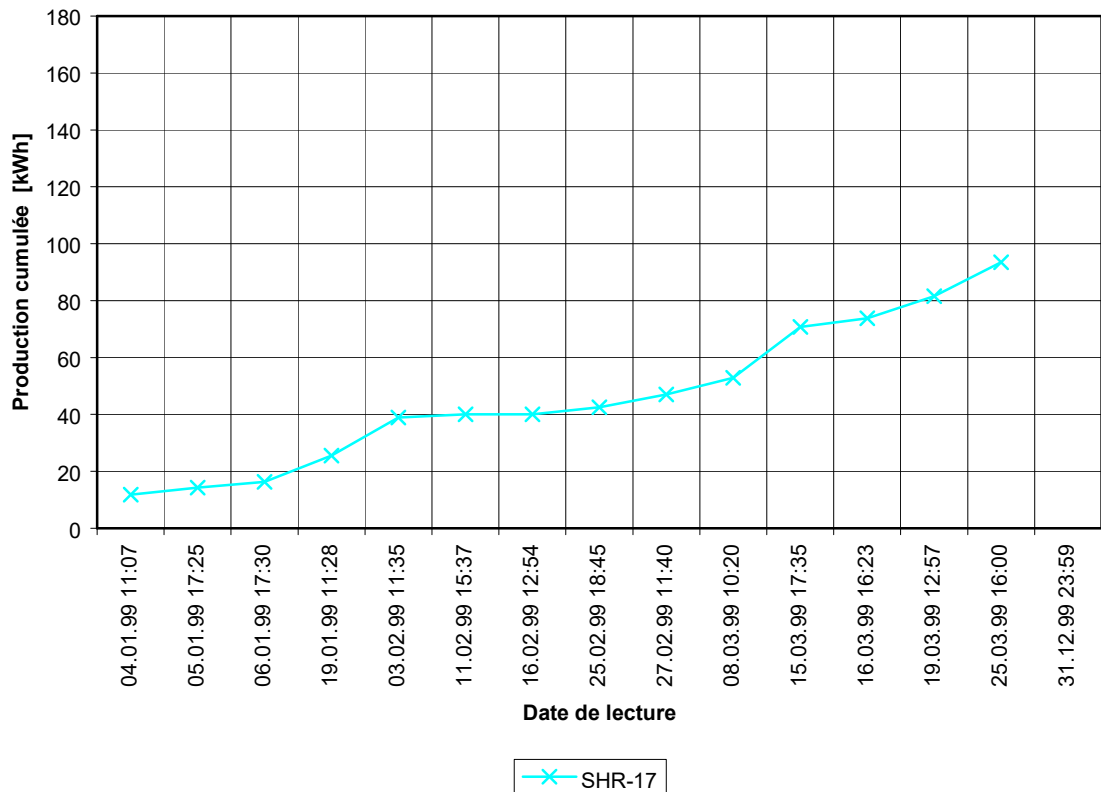


Figure 4.4: Production d'énergie cumulée 1999 (Uni-Solar)

*Elimination:* L'étude d'ouvrages spécialisés permet de qualifier de maîtrisable l'élimination de tous les produits considérés. Les installations ne sont toutefois pas entièrement recyclables et nécessitent de l'énergie pour les processus d'élimination. Ces derniers doivent donc impérativement être pris en compte lors de l'établissement d'un bilan écologique.

#### **4.5 Conclusions et perspectives du test de toiture solaire**

Le TEST DE TOITURE SOLAIRE 98-99 a montré qu'en matière de photovoltaïque intégrée aux bâtiments, il convient de tenir compte de toute une série de critères d'achat en plus des aspects souvent étudiés de l'efficacité et du prix. Ainsi donc, c'est principalement en raison de ses avantages dans les domaines de la distribution, de l'esthétique et du montage que le produit SUNSLATES™ de l'entreprise ATLANTIS s'est particulièrement distinguée dans le TEST DE TOITURE SOLAIRE 98-99.

### **5. CONCLUSIONS DE L'OPERATION PROMONT-SOLEIL**

Grâce au soutien du secteur privé, l'opération PROMONT-SOLEIL a réussi à dynamiser le potentiel d'utilisation du vaste savoir-faire dont dispose la Suisse en matière de photovoltaïque. Cette opération PROMONT-SOLEIL a permis non seulement d'obtenir des résultats neufs et intéressants grâce à une méthode innovante, mais encore de mettre en route des travaux de recherche et de développement plus approfondis.

#### **Adresses des auteurs:**

Rudolf Minder  
MINDER ENERGY CONSULTING  
Ruchweid 22  
CH-8917 Oberlunkhofen  
Téléphone 056 640 14 64  
Téléfax 056 640 14 62  
E-Mail [rudolf.minder@bluewin.ch](mailto:rudolf.minder@bluewin.ch)

Jakob Vollenweider  
BKW FMB ENERGIE SA  
Viktoriaplatz 2  
CH-3000 Berne 25  
Téléphone 031 330 58 29  
Téléfax 031 330 58 29  
E-Mail [jakob.vollenweider@bkw-fmb.ch](mailto:jakob.vollenweider@bkw-fmb.ch)