

Pour un Développement Durable : Le Photovoltaïque, Développements et Recherche en 2003

Jean-Pierre Charles¹, Simone Duchemin² et Marie-Claude Gillet-Artaud³.

¹C2EA (Composants, Electroniques, et Environnements Agressifs), MOPS-CNRS FRE 2304 (Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes), Supelec, 2 rue Edouard Belin, 57070 Metz. jp.charles@ieeee.org

²CEM2 (Centre d'Electronique et de Micro-optoélectronique de Montpellier), CC 86, UM2 (Université Montpellier II), Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5. Simone.Duchemin@cem2.univ-montp2.fr, ³artaud@cem2.univ-montp2.fr

1. INTRODUCTION

L'histoire humaine peut être divisée en **trois phases** successives distinctes. La *première* couvre toute l'histoire jusqu'en 1800. Elle a été caractérisée par une faible population urbaine, un faible taux de consommation d'énergie et un très faible taux de changement. La *seconde* se distingue par l'exploitation faite des énergies fossiles et de métaux industriels. C'est une période de croissance exponentielle. Cependant, du fait des limites terrestres en ressources de ces énergies fossiles et des minerais, cette seconde phase ne peut être que transitoire. Par voie de conséquence, la *troisième* phase doit être à son tour une période à faible taux de croissance mais, avec, initialement, une forte population et un fort taux de consommation d'énergie. Le problème le plus ardu qui se pose, peut-être, à l'humanité est de rendre la transition, de la phase actuelle de croissance exponentielle à la phase future d'état quasi-stationnaire, aussi non-catastrophique que possible [**81HUB**].

2. ENVIRONNEMENT ET EVOLUTION DES SOURCES D'ENERGIE

Face aux problèmes de la pollution et des limites des énergies fossiles, l'intérêt des énergies renouvelables suscite un engouement majeur et une forte tendance se développe pour un « développement durable » qui constitue peut-être une approche de solution pour la transition entre les phases 1 et 2. Ce doit être un objectif pour le 21^e siècle.

La combustion des énergies fossiles est associée à l'émission de polluants qui provoquent des pluies acides et des pollutions de l'air [03GEL].

- Ces polluants dégradent ainsi la santé du public et perturbent les écosystèmes. On estime à 500.000 le nombre de morts causées par la pollution atmosphérique annuellement dans le monde.
- Le dioxyde de carbone, associé à d'autres gaz à effet de serre, participe au réchauffement de l'atmosphère. Sa concentration atmosphérique est aujourd'hui la plus forte depuis 420.000 ans et la température de la surface terrestre a augmenté de 0,6°C. 1998 et 2001 ont été les années les plus chaudes des derniers millénaires. Si l'usage de ces énergies continue au rythme actuel, la concentration en dioxyde de carbone atteindra environ 3 fois celle du niveau pré-industriel et la température de la surface terrestre augmentera de 2 à 6°C d'ici 2100 [01IPCC].

Les réserves d'énergies fossiles non-renouvelables sont en quantités finies. La production de pétrole atteindra son pic dans les décades qui viennent et, dès qu'elle commencera à fléchir, le prix de ces énergies commencera à augmenter fortement. La rareté, les inégalités de distribution et de moyens sont des sources de tensions et de déséquilibre catastrophique.

Les énergies renouvelables proviennent de l'énergie solaire : hydroélectrique, géothermique, éolienne, biomasse, photovoltaïque. La surface de la Terre reçoit en moyenne 1 kW/m², soit, globalement, une énergie équivalente à 10.000 fois les besoins mondiaux en énergie, soit 3,8x10⁶ EJ/an alors que les besoins sont de 400 EJ/an. Environ 37% des besoins (150 EJ/an) sont destinés à la production d'électricité (16.000 TWh en 2001). Si toute cette électricité était produite par des systèmes PV, en supposant 100 kWh/m²/an, la surface de captage serait de 160.000 km². En utilisant des toits de maisons de 160 m², il faudrait en équiper 1x10⁹. Ce qui dépasse largement la réalité des besoins car les autres formes d'énergie solaire seront également utilisées.

Un développement durable, équilibré, est possible : la plupart des technologies permettant d'utiliser des énergies renouvelables sont déjà connues. Leur développement demande une modification des comportements : engagement des gouvernements et du secteur privé, soutien des recherches sur les nouvelles technologies, aide aux investissements pour les utilisateurs, information et éducation. Un scénario de développement des énergies renouvelables a été développé par le IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) et le WEC (World Energy Council).

La croissance de consommation d'énergie y est limitée à 0,8% par an et les énergies renouvelables fournissent 40% et 80% de la demande en 2050 et 2100, respectivement. Leur croissance est de 2,5% par an soit un doublement par 28 ans. L'énergie nucléaire disparaîtrait après 50 ans. Selon ce scénario l'émission de CO₂ commencerait immédiatement à diminuer. Sa teneur maximale serait atteinte en 2065 pour 425 ppmv (parts per million by volume), soit une valeur 52% plus grande que celle du

niveau de l'ère pré-industrielle. Ce qui correspondrait à une élévation de la température moyenne terrestre d'environ 1,4°C, ce qui est considéré comme acceptable. Suivant ce scénario l'écart de consommation entre les pays de l'OCDE et ceux en voie de développement diminuerait.

Les principaux obstacles à la mise en œuvre de ce scénario sont constitués par le manque de volonté politique et l'opposition de grands groupes industriels (pétrole, charbon, automobile,...) qui influencent des gouvernements et celui des USA en particulier.

3. PV, LE PHOTOVOLTAÏQUE, SON DEVELOPPEMENT JUSQU'EN 2002

L'augmentation de la production est un fait marquant de ce secteur : alors que jusqu'à ces dernières années les usines produisant 20 à 25 MWp de PV par an étaient la norme, des fabricants tels que Sharp, Sanyo et Kyocera envisagent des usines de production de 200 MWp. Ces usines sont presque entièrement automatisées et amènent une grande réduction des coûts. Un projet a montré qu'une usine d'une capacité de production de 500 MWp réduirait le coût des panneaux d'un facteur 4.

La production mondiale a atteint 561 MWp de cellules et panneaux en 2002, ce qui représente une augmentation de 170 MWp (43,8%) sur 2001 [03MAY]. Le Japon représente à lui seul presque 50% (251 MWp en 2002) de la production mondiale, sa progression est de 46,6% en 2002. La production Européenne a augmenté de 56% (135 MWp en 2002), celle des USA de 20% (121 MWp en 2002). En 2002, 85% (2002,5 GW) de la production mondiale de cellules et panneaux provient des 10 premiers fabricants. La plus forte progression sur 2001 est celle de Sharp avec 50 MWp, puis BP Solar avec 20 MWp et Sanyo avec 16 MWp.

Les installations PV connectées au réseau dans les secteurs commercial et résidentiel représentent la plus grande part du marché mondial actuel, 270 MWp en 2002, pour 60 MWp en zones rurales isolées, 60 MWp pour les communications, 60 MWp en produits pour particuliers, 45 MWp pour des installations PV-diesel et seulement 25 MWp en résidentiel hors réseau [03LYS]. Suite au développement des installations connectées au réseau, le prix de vente des modules silicium mono et poly-cristallins a baissé jusqu'à environ 3 \$US/Wp et les modules de silicium amorphe jusqu'à 2-3 \$US/Wp. Le développement du PV en milieu rural dans les pays non industrialisés est plus lent que prévu. Ceci tient au fait que : le pétrole est encore disponible à un prix artificiellement maintenu compétitif, le financement des systèmes PV doit être aménagé, les services d'entretien doivent être développés, l'information doit être aussi diffusée.

Les marchés photovoltaïques dominants sont le Japon, l'Allemagne et les USA. Le programme de développement japonais a commencé en 1994. Sa croissance est directement liée au système de subventions qui sont passées, au cours du temps, de 50% à 15% du coût de l'installation. Dans le cadre des accords sur le protocole de Kyoto il y aura 4,8 GWp installés en fin de programme en 2010. La capacité de production de l'industrie japonaise s'est ainsi développée pour pouvoir répondre à la demande et domine maintenant le marché mondial.

La production électrique est d'environ 750 kWh – 1500 kWh par kWp installé, ce qui correspond à un investissement de 0,20 à 0,80 €/kWh. Les prévisions donnent 2 à 3 €/Wp vers 2010. Le prix-plateau serait de 1 €/Wp avec une usine d'une capacité de 500 MWp/an de production.

4. PV, LE PHOTOVOLTAÏQUE, SES FILIERES

La production est représentée majoritairement par le silicium mono ou poly cristallin à 83,46% et 98, 63% pour l'ensemble des filières silicium.

Technologie	%
Si monocristallin	28,9
Si polycristallin	54,56
Total Si mono+poly	83,46
Si amorphe	5,8
Si monocrist. à concentrateurs	5,11
Si ruban	3,0
CdTe	0,83
CIS	0,54
Si microcristallin	0,66
Si sur substrats	0,3
Si amorphe sur Cz	0,3

La production de Photowatt (France, 10^{ième} rang mondial) était de 17 MWp sur les 135 MWp de production Européenne. Dans le secteur films minces, des côtés positifs et négatifs se manifestent :

- Une usine United Solar de 30 MWp (silicium amorphe) a commencé à produire à Auburn.

- Shell Solar a produit 1 MWp des modules CIS.
- AstroPower a produit 1 MWp de silicium film mince.
- Les usines de BP Solar de silicium amorphe (en Virginie) et de CIS (en Californie) ont été fermées.

Depuis une vingtaine d'années le photovoltaïque a vu sa production augmenter, ses coûts baisser et le nombre de ses applications se développer de manière quasi-exponentielle, lui aussi. Ce développement rencontre toutefois des problèmes de production et, parmi toutes les options disponibles, des choix sont faits. Le facteur économique joue son rôle et des filières ont été provisoirement abandonnées suite à un manque de maturité. Les grandes entreprises internationales demandent un retour sur investissement de l'ordre de 20% environ [03ECK]. Pour cause de profits insuffisants Westinghouse, IBM, Motorola, Xerox, Texas Instruments, Exxon, Shell-US, Arco, Mobil, Siemens,... ont quitté ce secteur commercial. Par contre BP en 96 et Shell en 97 y sont entrées. C'est ainsi qu'en novembre 2002 BP Solar (Lithicum, Md, USA) a annoncé la fermeture de l'usine produisant des cellules films-minces silicium amorphe (a-Si) et aussi CdTe [03FAI]. Cette usine et celle du groupe Shell Solar d'Amsterdam recevaient 50 millions de \$US chaque année du NREL (National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado). La production avait augmenté de 34% en 2001. Cependant les rendements restaient faibles, 5 à 7%, avec dégradation après installation et la production de l'usine n'excédait pas 1 MWp par an au lieu des 8 prévus. Le principal client-distributeur PowerLight Corp., avait arrêté ses commandes de cellules CdTe. Les usines BP continuent cependant de produire des modules films minces à silicium mono et poly-cristallin. Le marché du film mince devrait décoller vers 2010 et rivaliser avec celui du silicium massif.

5. PV, RECHERCHE

Les travaux de recherche restent donc une nécessité mais leurs thématiques évoluent. Parmi celles-ci, la filière **CIGS** (CuInGaSe_2) par exemple, structures photovoltaïques à hétérojonctions, concurrentielle du Silicium, demande encore un approfondissement des connaissances de base. Quel sera le marché de demain ? Les résultats de la recherche seuls ne peuvent être décisifs car le développement de la production industrielle est une adéquation entre le marché, les investissements et, parfois, la volonté politique.

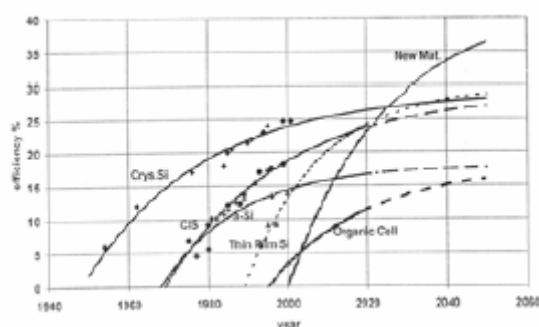


Fig. 1: Evolution du rendement de conversion de photopiles des différentes filières : Si cristallin (plaque), couche mince (CIS, a-Si, pc-Si,...), matériaux organiques (polymères,...) et nouveaux matériaux. D'après Goetzberger & Luther (Fhg-ISE,D).

La figure 1 montre l'évolution du rendement quantique des cellules photovoltaïques depuis leur avènement à nos jours en plus d'une projection à très long terme. La représentation pourrait être rapprochée de celle de Moore pour la microélectronique.

La «**première génération**» de photopiles, basée sur le silicium monocristallin Cz ou multicristallin découpées en plaquettes à partir de lingots, constitue actuellement l'essentiel de l'industrie photovoltaïque. Au fur et à mesure que cette technologie mûrit, le coût final devient dominé par celui du matériau, à savoir la plaquette Si (100 cm²). On estime qu'une progression en volume annuelle de 500MW se traduirait par un coût total du matériau de base de 70%. Ceci encourage les recherches sur le haut rendement pourvu que cela ne complique pas trop les procédés de fabrication de la cellule. Des rendements de ~ 24% sur cellules (~20% sur modules) ont pu être obtenus en laboratoire, valeurs assez proches de la limite théorique de 27%. Les travaux sur l'utilisation des procédés thermiques rapides dans la réalisation de photopiles allaient dans le sens du haut rendement mais également vers le faible coût. La simplification des procédés reste une priorité en vue de transfert vers l'industrie. Les travaux actuels s'orientent vers de nouveaux concepts de cellules (hétérostructure (HIT) ; face arrière (FCC)) et sur des procédés de passivation (nitride de silicium (SiN :H ; champ arrière (BSF)) en utilisant des plaquettes très minces (~100µm).

La «**deuxième génération**» de la technologie photovoltaïque est basée sur le développement de couche minces (chalcogénure (CIS), Si amorphe et cristallin) sur substrats étrangers et bon marché avec comme avantages un faible coût, des plus grandes surfaces (1m²) et surtout l'élimination de la plaquette Si. Dans le domaine de la conversion photovoltaïque, le silicium en couches semi-minces (5 à 20 µm d'épaisseur) sur substrats céramiques (graphite, mullite, SiSiC, SiN) semble être une approche prometteuse car elle allie les

avantages de la bonne maîtrise de la technologie silicium et ceux de la couche mince en plus du confinement optique.

Dans le cas du silicium cristallin en couche mince, à cause de sa bande interdite indirecte, une épaisseur de 10-20 μm combinée à un piégeage efficace de la lumière est nécessaire afin de réaliser des cellules à rendement convenable ($> 14\%$). Nous présenterons ici les nouvelles voies d'investigations du silicium cristallin en couche mince à gros grains sur substrat céramique par épitaxie en phase solide induite par métaux (MIC) ou par CVDOLL (CVD sur couches liquides), et également par le transfert d'une couche monocristalline de silicium. La «nouvelle génération» de photopiles impliquant des couches minces - organique ou inorganique - et des objets nano-structurés a émergé et est en plein développement. Elle devrait permettre des rendements plus élevés mais nécessite encore beaucoup d'investigations. Nous présenterons différentes voies utilisant des nanocristallites de silicium, germanium (puits quantiques) ou semi-conducteurs III-V dans des structures classiques. Les potentialités photovoltaïques de telles structures seront discutées.

De simples considérations thermodynamiques montrent que la limite de la conversion de la lumière solaire en électricité est de 93% comparée à la valeur ultime de 33% d'une cellule à simple jonction à base de silicium ou plus récemment en couches minces. Parmi les principales pertes, il y a le processus de thermalisation ou la paire photoexcitée perd très rapidement la partie de son énergie supérieure à celle de la bande interdite. Un photon rouge de faible énergie est alors aussi effectif qu'un photon bleu de grande énergie !! Rien que cette perte limite le rendement à 44%. Un autre important mécanisme de perte dans la cellule traditionnelle est celui via le processus de recombinaison des paires électrons-trous photoexcités (à l'opposé de celui de leur génération). Ceux-ci suggèrent qu'il y a encore des potentialités pas suffisamment exploitées et qui permettrait d'augmenter sensiblement le rendement de conversion si différents concepts sont impliqués. Ceci constituera la « nouvelle génération » des cellules solaires, comme le seront les composants quantiques en microélectronique dans un avenir proche.

Pour le moment, plusieurs voies, plutôt spéculatives, sont proposées dans la littérature [00GRE] puisqu'elles reposent souvent sur des concepts de transport de charges qui ne tiennent pas compte de la nature exacte des matériaux utilisés. La pureté des matériaux et la qualité des interfaces constituent toujours un obstacle majeur à l'aboutissement des concepts.

5.1. Structures avec Etats Intermédiaires

Parmi les alternatives à la réduction de la recombinaison il y a la cellule tandem composée de deux ou plusieurs semi-conducteurs à gaps décroissants afin d'absorber le maximum du spectre solaire. Les meilleures cellules sont celles à double ou triple jonctions sur GaInP/GaAs/Ge [99KAR] avec des rendements approchant les 30%, bien loin des 50% prédits théoriquement [78BEN]. La limitation est due à la difficulté d'accorder les courants de sortie des cellules connectées en série. Plus récemment, des cellules solaires à puits quantiques (QWSC, Quantum Well Solar Cell) ont été proposées comme nouvelle structure pour les photopiles à haut rendement [90BAR, 00KIR, 01NOZ].

Les puits quantiques sont des couches très minces d'un matériau à faible énergie de bande interdite (BI) dans un matériau à grande énergie de BI. Ceci étend l'absorption de la cellule en dessous de l'énergie gap du matériau massif tout en gardant les propriétés du courant sous obscurité correspondant à une énergie de gap entre celle du puits et du matériau massif. La conséquence directe est une plus grande collecte et un fort courant de génération. Le deuxième avantage est une réduction des processus de recombinaison due au plus faible courant sous obscurité, d'où une meilleure tension de circuit-ouvert. Des simulations et expériences ont montrées que les porteurs peuvent traverser une région QW sans thermaliser dans le puits, c'est à dire sans être capturés [96ABO]. Dans ce type de cellule, le photocourant et la tension de sortie peuvent être optimisés indépendamment. En effet, le seuil d'absorption et les caractéristiques spectrales peuvent être ajustés par la largeur et la profondeur du puits, alors que la tension de sortie est plutôt déterminée par la grande bande interdite du matériau massif.

5.2. Structures à conversion lumineuse

La thermalisation des porteurs chargés, générés par l'absorption de photons de grande énergie, est une des pertes majeures par laquelle l'énergie est gaspillée dans les structures conventionnelles. Une manière de réduire les pertes est la multiplication des porteurs, c'est à dire la génération de multiples paires électron-trou par photon incident pour des énergies plus grande que deux fois l'énergie de bande interdite du matériau de la cellule. Parmi les approches, il y a l'utilisation d'un convertisseur de photons de grande énergie en deux ou plusieurs photons de faible énergie. Un cas idéal est un convertisseur luminescent placé sur la face avant d'une cellule standard [02TRU]. La condition importante est que le convertisseur doit être isolé électriquement de la cellule, c-a-d le couplage entre la couche luminescente et la cellule est purement radiatif. Les matériaux candidats les plus prometteurs comme convertisseur par luminescence sont ceux dont le rendement quantique de luminescence a été déjà démontré tels que les composés à terre rare ou à métaux de transition et également les semiconducteurs confinés spatialement tels que les îlots ou puits quantiques. En particulier, les nanocristallites de silicium (nc-Si) et/ou germanium (nc-Ge) sont assez étudiées compte tenu de leurs applications potentielles comme composants à

émission de lumière ou structures à mémoire de charges. La photoluminescence à température ambiante de ces cristallites pourrait également avoir de l'intérêt pour le photovoltaïque. En effet, si la présence sur la surface de la cellule d'une couche qui permet de « convertir » les photons bleus en photons rouges par luminescence, alors ces derniers augmentent indirectement le rendement de conversion dans la région de forte absorption.

5.3. La recherche sur CIGS au CEM2

Les études concernent la conversion photovoltaïque et plus particulièrement la réalisation et l'étude de cellules photovoltaïques en couches minces à base de matériau absorbeur CuInGaSe_2 (CIGS). Les recherches sont effectuées dans le cadre des différents programmes de la communauté Européenne et des programmes nationaux du CNRS et de l'ADEME (anciens programmes ECODEV, programme actuel Energie).

La filière à base de matériaux CIGS a déjà prouvé son efficacité en terme de rendement (>19%) et de rentabilité aussi bien pour des applications terrestres que spatiales puisque des dispositifs testés sur satellite depuis plus de trois ans n'ont encore montré aucune dégradation. De plus cette filière de photopiles à base CIGS est particulièrement attractive pour réaliser l'absorbeur d'une cellule photovoltaïque car elle offre un large éventail de composés semi-conducteurs avec des largeurs de bande interdite pouvant absorber la majeure partie du rayonnement solaire (depuis l'ultraviolet jusqu'à l'infra-rouge). Ceci offre alors comme perspective le développement de cellules solaires multispectrales en utilisant un tandem de deux cellules empilées ayant des absorbeurs de largeurs de bande interdite ($\text{gap}=\text{E}_g$) différentes de sorte que la cellule supérieure recevant directement le rayonnement solaire possède la plus grande bande interdite. Ainsi cette cellule supérieure, par exemple à base de CuGaSe_2 (CGS, $\text{E}_g \# 1,7 \text{ eV}$), va absorber tout les photons d'énergie supérieure à son gap (ultra-violet et visible) et transmettre les photons moins énergétiques (infra-rouge) à la cellule inférieure composée de CuInSe_2 (CIS, $\text{E}_g \# 1 \text{ eV}$) qui va pouvoir les absorber. Ce dispositif en faisant un meilleur usage du spectre solaire va donc augmenter l'efficacité du capteur et permettre l'obtention de rendements de conversion plus élevés qu'avec une seule photopile puisque des performances dépassant 36% ont été théoriquement calculées.

Actuellement au laboratoire les recherches portent plus particulièrement sur la cellule photovoltaïque en couches minces à base de CuGaSe_2 pour le développement futur de tels capteurs photovoltaïques multispectraux. L'originalité des recherches est basée sur la réalisation d'une cellule à base de CGS dans la configuration dite "superstrate" (voir schéma ci-après) par opposition à la cellule standard encore appelée "substrate" classique. En effet jusqu'à présent les rendements élevés, comme mentionné précédemment, ont été obtenus sur des hétérostructures empilées standards nécessitant l'utilisation d'une couche tampon intermédiaire contenant du cadmium, élément nocif pour l'environnement. La configuration "superstrate", constituée aussi de différentes couches semiconductrices empilées d'épaisseur voisine du μm , s'avère primordiale pour la réalisation à plus longue échéance du dispositif multispectral et a un double avantage par rapport à la configuration substrate classique puisqu'elle permet d'éliminer la couche tampon de CdS tout en offrant une encapsulation plus aisée du capteur: c'est d'abord la fenêtre transparente et conductrice jouant le rôle d'émetteur de type n/n+ (le plus souvent constituée par un oxyde: OTC) qui sera déposée sur le substrat de verre, suivie du dépôt de l'absorbeur (de type p) tandis qu'un contact métallique sera déposé à l'arrière.

Techniques de fabrication

Le matériau est déposé par transport en phase vapeur à courte distance (CSVT) sur un substrat de verre recouvert d'un oxyde transparent conducteur (OTC) dans le but de réaliser une photopile [CuGaSe_2 /OTC/verre] performante.

La technique de fabrication par transport en phase vapeur à courte distance (CSVT) est une méthode faible coût qui permet d'obtenir des dépôts de bonne qualité en des temps courts ($1 \mu\text{m}/\text{mn}$) avec des températures de substrat inférieures à 600°C compatibles avec des substrats peu chers tels que le verre.

Le principe de cette méthode CSVT est le même que celui de la CVD, à savoir l'obtention d'un équilibre chimique réversible et le transport dans une phase gazeuse. La CSVT diffère par la distance source-substrat qui est de l'ordre du mm, d'où un changement important dans les mécanismes de transport et donc sur les résultats.

L'adaptation de la méthode CSVT à un matériau donné se fait tout d'abord par le choix du moyen de transport. Pour les matériaux I-III-VI₂, le meilleur moyen connu est le transport par l'iode à partir d'une source constituée par le matériau déjà synthétisé. L'iode étant solide à température ambiante, son transport nécessiterait des canalisations chauffées, ce qui compliquerait la méthode. On utilise donc un réacteur horizontal ouvert balayé par un gaz neutre (argon) : une petite quantité d'iode favorise la réaction. Le matériau source est réalisé au laboratoire par synthèse des différents constituants.

Caractérisations

L'étude de la fenêtre optique (OTC) [02BOU] et de l'absorbeur notamment au niveau des interfaces sont aussi étudiés pour contribuer à l'amélioration et à l'efficacité du dispositif.

Les moyens classiques de caractérisation sont utilisés pour les matériaux: R.X, microscopie électronique à balayage (MEB, EDS), caractérisations électriques et optiques, ainsi que des expérimentations moins triviales telles que photoluminescence [01NOZ], mesures ellipsométriques,... Plus particulièrement toutes les techniques nécessaires à l'étude du dispositif et à une meilleure connaissance des propriétés des interfaces sont mises en œuvre (I-V, C-V, XPS).

6. CONCLUSION : FINANCEMENT ET CROISSANCE

La progression rapide de la demande énergétique mondiale favorise le développement de l'énergie photovoltaïque. Cependant, celle-ci doit relever deux défis : le faible coût et le haut rendement. Parmi les investigations de part le monde, il y a le développement du silicium cristallin de quelques microns d'épaisseurs sur des substrats peu chers. Les recherches s'orientent vers différentes voies qui concernent la structure de la cellule comme le concept TREBLE (Three-dimensional Emitter Based on Locally Enhanced diffusion)[02CHR] ou HIT, ou l'élaboration de Si polycristallin à gros grains par la cristallisation induite par métaux, le dépôt CVD sur couche liquide ou bien le transfert de Si cristallin. Le but ici est de réduire le coût. Par ailleurs, beaucoup de recherches - encore fondamentales et expérimentalement préliminaires - concernent actuellement des cellules photovoltaïques à semi-conducteurs impliquant des cristallites de taille nanométriques (puits et îlots quantiques). L'objectif étant d'approcher le rendement théorique en réduisant les pertes par thermalisation et par recombinaison.

Alors que le développement humain devrait tendre vers une stabilisation (3^{ème} phase de son évolution), la production des ressources fossiles doit s'incliner vers une décroissance pour céder la place aux énergies renouvelables, dont le photovoltaïque, qui suivent une croissance exponentielle. Les prévisions de développement des secteurs PV se font avec un doublement en 5 ans de la puissance connectée au réseau.

Un scénario proposé prévoit une croissance comprise entre 25 et 50% [03ECK]. Avec un taux de 25% (doublement chaque 2,8 ans) les installations annuelles seront de 2.500 MWp en 2010. Avec un taux de 50% (doublement chaque 1,4 ans) les nouvelles installations seront de 10.000 MWp par an en 2010.

Ces scénarios anticipent un coût des modules de 1,50 \$US/Wp en 2010. L'échelle des usines doit augmenter en proportion et les investissements doivent s'élever à 25 et 114 milliards de \$US pour les 10 prochaines années. Un tel développement du PV n'est envisageable qu'avec celui du marché des systèmes connectés au réseau. Les expériences passées ont montré, comme au Japon récemment, qu'une politique de subventions était indispensable pour inciter les utilisateurs à s'investir.

REFERENCES

- 78BEN A. Bennet and L.C. Olsen, Conf. Rec. IEEE PV-SEC 13, 868 (1978).
 81HUB M. King Hubbert, The World's Evolving Energy System, AM. J. Phys., 49/11, 1007-1029 (1981).
 90BAR K.W.J. Barnham and G. Duggan, J. Appl. Phys. 67, 3490 (1990).
 96ABO M. Abou-Khalil et al. IEEE Photon. Techn. Lett. 8, 19 (1996).
 99KAR N.H. Karam et al., IEEE TED-46, 2116 (1999).
 00GRE M.A. Green, Proceedings of 16th European Photovoltaic Conference (Glasgow Mai 2000).
 00KIR S. Kiravittaya et al., 28th IEEE PVSC, 818 (2000).
 01HAN Mark Hankins, "Gried-tied Markets for Photovoltaics – a new source emerges", Renewable Energy World, 4/4, 176-189 (2001).
 01IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001: The Scientific Basis, IPCC, Geneva, Switzerland (2001).
 01NOZ J. Nozik, "Photovoltaic for the 21st Century", Proc. of ECS, Washington (2001).
 01ORS G. Orsal, F. Maily, N. Romain, M. C. Artaud, and S. Duchemin, "Photoluminescence Study of CuGaSe₂ Thin Films Grown by MOCVD", Thin Solid Films, V.387, pp.198-200 (2001).
 02BOU H.Bouzouita, N.Bouguila, S.Duchemin, S.Flechter, and A.Dhouib "Preparation and Characterisation of In₂Se₃ Thin Films", Renewable Energy, Issue 1, Vol. 25, pp.131-138, (2002).
 02CHR E. Christoffel, M. Rusu, A. Zerga, S. Bourdais, S. Noël, and A. Slaoui, "A 2D-Modeling of the Fine-Grained Polycrystalline Silicon Thin-Film Solar Cells", Thin Solid Films, V. 403-404, p. 258 (2002).
 02FRA Lewis Fraas and Bob McConnell, "High Power Density Photovoltaics – A Path to Cost-Competitive Solar Electric Power", Renewable Energy World, 5/5, 98-109 (2002).
 02TRU T. Trupke, M. Green and P. Würfel, "Improving solar cell efficiency by down-conversion of high-energy photons", J. Appl. Phys. 92(3), 1668 (2002).
 03ECK Michael T. Eckhart, Jack L. Stone, and Keith Rutledge, "Financing PV Growth", Renewable Energy World, 6/3, 112-127 (2003).
 03FAI Peter Fairley, "BP Solar Ditches Thin-Film Photovoltaics", IEEE Spectrum, 40/1, 18-19 (2003).
 03GEL Howard Geller, "Energy Revolution", Renewable Energy World, 6/4, 34-49 (2003).
 03LYS Erik Lysen, "Photovoltaics, an outlook for the 21st Century", Renewable Energy World, 6/1, 42-53 (2003).
 03MAY Paul Maycock, "PV Market Update", Renewable Energy World, 6/4, 84-101 (2003). www.pvenergy.com
 03SLA Abdelilah Slaoui, "Matériaux et structures avancées pour la conversion photovoltaïque", Congrès COMPLES'2003, 19-20 octobre 2003, Alep, Syrie.