

Système opto photovoltaïque 2 et 3D Double vitrages photovoltaïques et tours solaires

Une tendance forte du développement photovoltaïque est l'intégration dans les bâtiments (BIPV: building-integrated photovoltaics). Divers éléments architecturaux deviennent bi ou polyfonctionnels (support, lumière, isolations phonique et thermique, production d'électricité,...). Dans ce contexte le verre peut jouer un rôle essentiel comme matériau multifonctions "intelligent". Dans l'élaboration de tels verres, un premier enjeu évident est de laisser passer les longueurs d'onde qui pourront être converties efficacement par les photopiles [11].

Cet article présente de manière succincte plusieurs technologies développées et brevetées par le LPRL (Laboratoire de Physique du Rayonnement et de la Lumière). Ces procédés associent un dopage particulier des verres organiques ou inorganiques traités et des architectures nouvelles pour augmenter l'efficacité de la conversion photoélectrique. Ces techniques font ainsi passer le verre de matériaux technique d'encapsulation au rang de composant photovoltaïque majeur.

LPRL has developed proprietary enabling technologies in the field of photovoltaics. Special material compositions and system configurations combine wavelength-shifting effects and waveguide effects to optimize the quality and quantity of direct and diffuse sun light before it reaches solar cells. Sample applications include photovoltaic double-glasses and photovoltaic solar towers. It is anticipated that these next-generation luminescent solar concentrators in the form of glass-based, building-integrated photovoltaics will play an important role in accelerating the shift towards renewable electricity.

PRINCIPE DES CASCADES LUMINEUSES

Le principe des cascades lumineuses (CL) est de permettre, par dopage d'une matrice par des substances optiquement actives (SOA) organique ou minérale, en solution ou en dispersion, de transférer tout ou partie de l'énergie incidente, dans les bandes de longueur d'onde de plus grandes sensibilités du capteur électromagnétique, les cellules photovoltaïques par exemple.

Ce type de transfert d'énergie est basé sur le principe de l'absorption à λ_1 de l'énergie incidente donnant naissance à une réémission à λ_2 , puis λ_n , cette énergie λ_n s'additionnant à l'énergie incidente naturelle dans la bande de fréquence de plus grande sen-

sibilité de la photopile.

Ces transferts d'énergie où $\lambda_1 < \lambda_n$ répondent à la loi de Stokes.

Il est également possible de réaliser des systèmes de type anti-Stokes où plusieurs photons sont absorbés avant réémission d'un photon d'énergie plus grande (cas $\lambda_1 > \lambda_n$).

L'idée d'adapter spectralement la lumière avant qu'elle n'atteigne les cellules photovoltaïques a été brevetée au début des années 1970 [1]. Nous avons rapidement étendu cette idée à la concentration de la lumière et à des systèmes multimoléculaires de diverses géométries [2].

Des approches de même inspiration ont notamment été développées ensuite par le professeur. Adolf Goetzberger et al, fonda-

teur du premier institut solaire européen, promu inventeur de l'année 2009.

PREMIÈRE CONSÉQUENCE

Dans l'application photovoltaïque, le principe des cascades lumineuses mis en œuvre optimise l'interaction rayonnement/matière en mobilisant dans la plage de longueur d'onde de plus grande sensibilité des cellules solaires au silicium par exemple, le maximum d'énergie électromagnétique par décalage de fréquence du spectre solaire incident. À 365 et 440 nm les photopiles ont un pouvoir de conversion de seulement 25 et 50 % de leur potentiel de conversion maximum. Les photons incidents dans les bandes solaires de plus

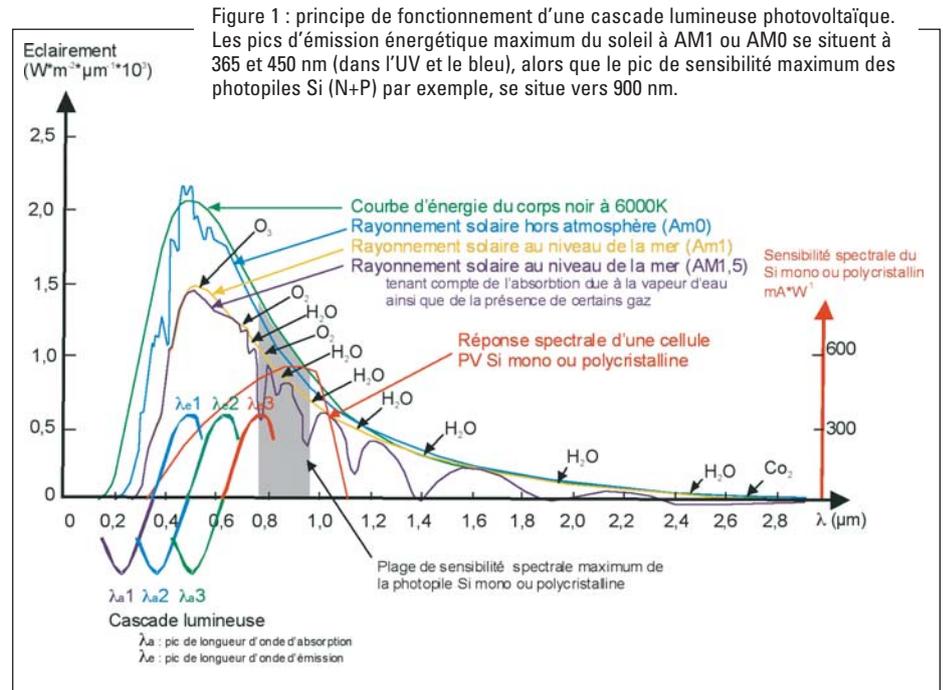
grande énergie sont donc transformés pour une grande partie d'entre eux en chaleur, échauffant ainsi les piles et diminuant proportionnellement le rendement. (Les pertes par thermalisation des phonons sont de l'ordre de 1 % de rendement par différence de +15 °C au-delà de 10 °C). On voit donc tout l'intérêt que l'on peut tirer, dans un premier temps, du transfert des photons de plus haute fréquence λ_i (365 - 440 nm) en λ_e (800 - 900 nm) selon la loi de Stokes ($h\nu_e \ll h\nu_i$).

MISE EN ŒUVRE DES CASCADES LUMINEUSES

Il est apparu opportun de réaliser d'abord une matrice de type polyméthyl métacrylate (matériau bien connu pour ses qualités mécaniques et optiques en aéronautique et pour ses caractéristiques de stabilité physico-chimiques dans l'industrie nucléaire où elle est utilisée comme scintillateur) dopée par des molécules optiquement actives (MOA) de type cyclique aromatique par exemple, dont le nombre de noyaux ϕ détermine les longueurs d'onde d'absorption et d'émission.

Les molécules optiquement actives sont sélectionnées de telle sorte que les plages d'émission des unes correspondent aux plages d'absorption des autres. On réalise ainsi, de $\lambda\lambda_i$ en $\lambda\lambda_e$ une matrice à cascade lumineuse de type PV 1.5, homogène, dont l'émission correspond à la plage de $\lambda\lambda_{abs}$ de plus grande sensibilité des photopiles (rouge et infrarouge proche).

Le rendement énergétique de ce matériau dépend des caractéristiques intrinsèques de la matrice et des molécules optiquement actives de dopage, dont la règle de concentration doit être en raison inverse de leur poids moléculaire, sauf à provoquer, sous excitation, des phénomènes de self-quenching (ou auto-extinction) et à en altérer la solidité lumière. Ces différents paramè-



res ont fait l'objet de recherches approfondies au LPRL.

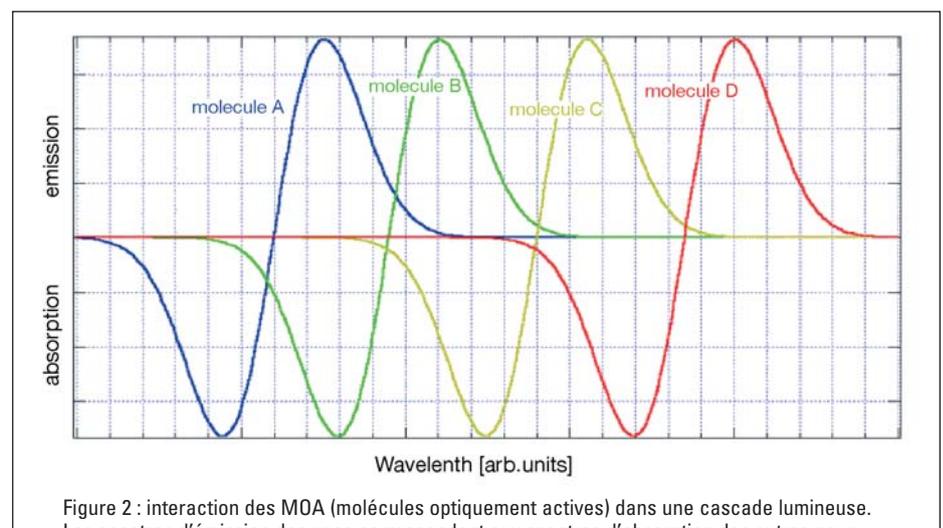
LES EFFETS CONJUGUÉS

Une fois réglé le problème des pertes par thermalisation par transfert des photons UV et 440nm vers le rouge et le proche infrarouge, plusieurs effets se conjuguent simultanément :

- décalage de fréquence : création d'un plus grand nombre de photo-électrons diffus utiles à la cellule, contribuant de plus à l'élimination du phénomène de hot-spot.
- matrice homogène : optimisation des rendements de conversion (figure 2).

Dans un premier temps les CL photovoltaïques ont été organisées en couches successives spécialisées $\lambda\lambda$ par $\lambda\lambda$ disposées devant la cellule. Cette première architecture faisant apparaître un déficit théorique de 50 % par strate, nous avons opté pour des matériaux à structure et mélange homogène dont la justification théorique est apportée au chapitre suivant.

Nous avons en effet constaté qu'utiliser une matrice monocouche à mélange homogène de plusieurs MOA complémentaires était plus performant et beaucoup plus simple que la technique des couches stratifiées spé-



cialisées. Des modélisations thermodynamiques ou de type ray tracing, permettent d'envisager une approche quantitative du phénomène [3].

ADAPTATION DU SPECTRE SOLAIRE À LA RÉPONSE SPECTRALE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES, SILICIUM MONO OU POLYCRISTALLIN

Il a été démontré, l'intérêt de mobiliser au niveau de la plage de sensibilité maximum de la photopile le maximum d'énergie incidente pour obtenir la plus grande quantité possible de courant photoélectrique. C'est une des fonctions des matériaux à cascade lumineuse, avec une meilleure prise en compte des rayonnements incidents diffus et réémis en 4π stéradians vers la cellule.

On voit ici que l'énergie solaire utilisée est définie par la zone de recouvrement des spectres d'émission de la lumière solaire et d'absorption de la photopile.

Compte tenu de la spécificité de la pile, (absorption de photons d'énergie correspondant à des longueurs d'onde comprises entre 700 et 800 nm), et du fait que l'énergie fournie par la photopile est fonction de l'intensité du faisceau

lumineux incident et du nombre de photons utiles, on augmente le rendement de la pile en décalant la fréquence des photons de la partie du spectre solaire UV \rightarrow visible vers les longueurs d'ondes situées au-dessus de 700 nm.

Ce premier procédé développé par le LPRL permet ainsi la transformation de photons hautes fréquences (250 – 600 nm) en photons basses fréquences (600 - 700 nm), par exemple en utilisant des matériaux à cascades lumineuses, qui ont déjà fait l'objet d'applications industrielles en France et aux Etats-unis par la production de générateurs PV en verre organique type polyméthyl-métacrylate dopés (gain de production photoélectrique obtenu : 1,25).

PARCOURS DES PHOTONS DANS UN MATÉRIAU À CL ET EFFETS CONJUGUÉS

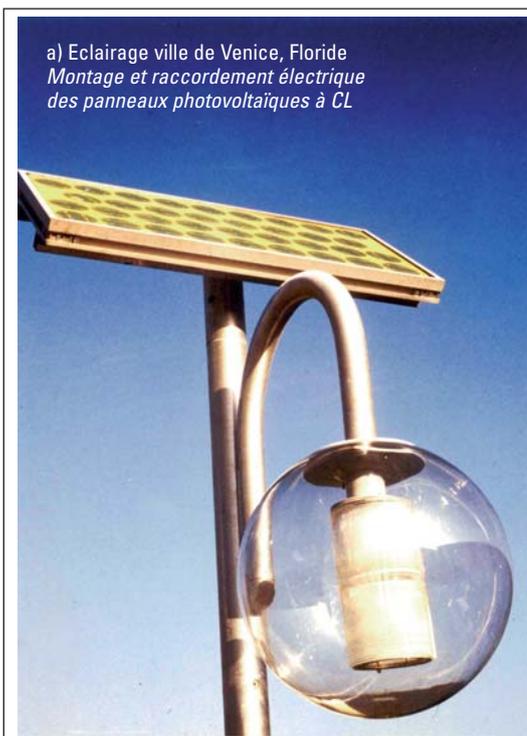
Les travaux conduits par le LPRL ont permis de mettre en évidence le décalage de fréquences produit par les matériaux à cascades lumineuses et le fait qu'il s'accompagne d'autres phénomènes optoélectroniques qui, dans certaines conditions, participent de l'amélioration des rendements photoélectriques.

Par exemple :

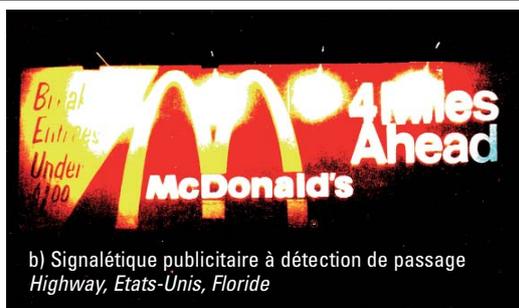
- La réémission des photons $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$ en 4π stéradian et son corollaire le guide d'onde qui permettent une meilleure prise en compte de la lumière diffuse et de l'albedo dans toute la largeur du spectre occupée par les cascades lumineuses,
- La récupération de photons tombés hors la cible,
- La concentration d'un flux lumineux secondaire et monochromatique sur les tranches du matériau, ou en un point singulier, flux lumineux résultant dont l'intensité est supérieure au flux orthogonal initial incident.
- La prise en compte de l'énergie diffuse et de faible incidence affranchît les concentrateurs plans à cascades lumineuses de la servitude de tout système de tracking.

ENCAPSULATION OPTIQUEMENT ACTIVE ET INTERACTION PHOTONS/MOA

Les matériaux cascades lumineuses sont constitués d'une matrice caractérisée par une transmission élevée dans le visible et l'IR et de MOA (molécules optiquement



a) Eclairage ville de Venice, Floride
Montage et raccordement électrique des panneaux photovoltaïques à CL

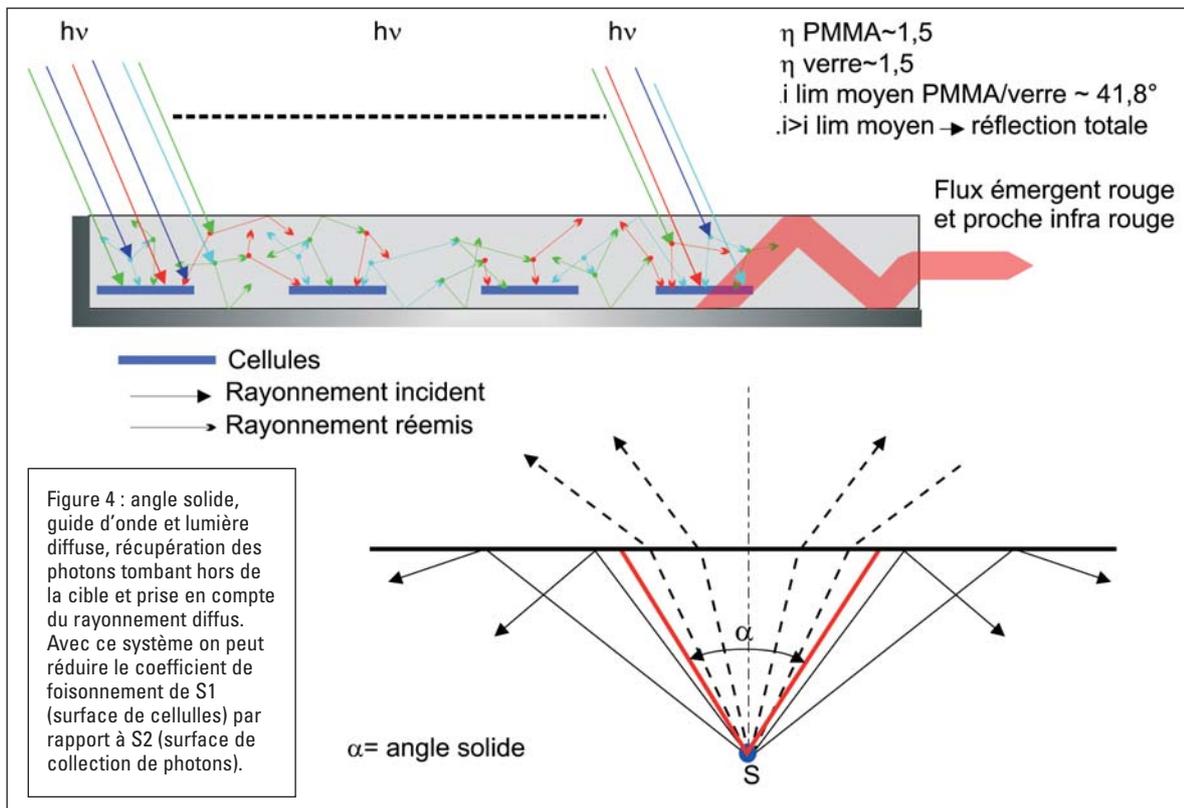


b) Signalétique publicitaire à détection de passage Highway, Etats-Unis, Floride



c) Radio Balises Militaires
Signalisation discrète de terrains Aéronautique

Figure 3 : exemples d'applications réalisés avec le procédé CL Opto PV 2D



actives) telles que les spectres d'émission des uns correspondent aux spectres d'absorption des autres, successivement, permettant ainsi de couvrir la totalité du spectre solaire dans la zone choisie, par exemple, dans la plage 250 - 800 nm, recouvrement en fréquences ou en longueurs d'ondes. Une radiation lumineuse de longueur d'onde déterminée λ_p est absorbée par la substance dont le spectre d'absorption comprend cette valeur de λ .

Les photons $h\nu_n$ ou hc/λ_n qui ont permis d'exciter les molécules de cette substance (phénomène d'absorption) sont ainsi éliminés du faisceau incident. L'état instable conféré aux molécules est de très courte durée (nanoseconde). Le retour à l'état fondamental s'effectue en partie par une émission radiative.

Les photons ainsi générés correspondent au spectre d'absorption d'autres MOA qui interagissent dans des longueurs d'onde supérieures. Une MOA/CL peut ainsi absorber soit l'émission de la MOA qui la précède dans la séquence cascades lumineuses,

(énergie transformée), soit la partie de l'émission du spectre solaire qui lui correspond (énergie non transformée). C'est cet ensemble d'absorption / réémission successive qui constitue le phénomène de cascade lumineuse.

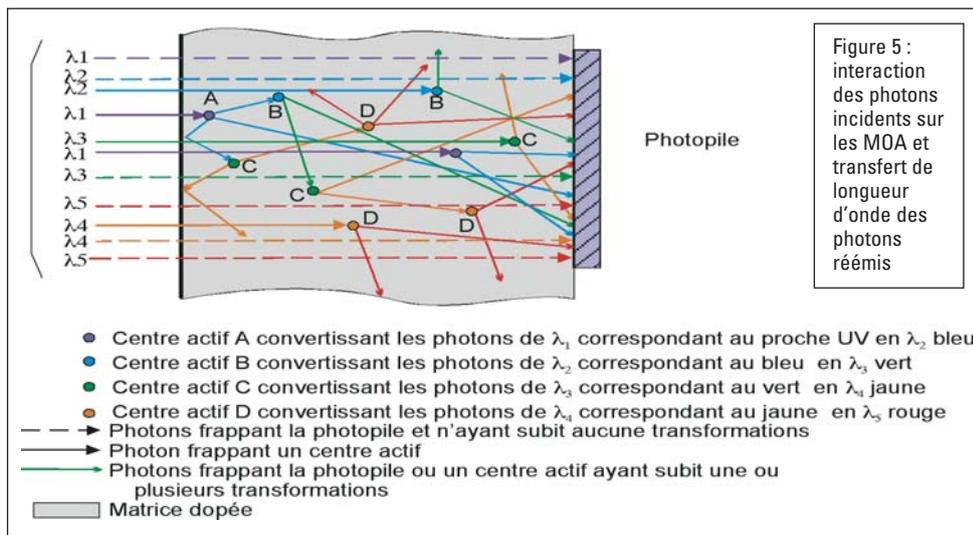
DES GAINS NOTABLES PHOTOÉLECTRIQUES

Une des premières applications du concept des cascades lumineuses a été l'adaptation du spectre solaire à la réponse spectrale

des photopiles. Les CL peuvent être intégrées dans la masse des matériaux d'encapsulation organiques ou sous forme filmogène pouvant être appliqués sur des matériaux verriers.

POLYMETHYLEMETACRYLATE (PMMA)

Dans ce type de matrice support, l'introduction des MOA a été réalisée avec succès tant du point de vue rendement que du point de vue de la solidité lumière. Avec ce matériau utilisé pour la réalisa-



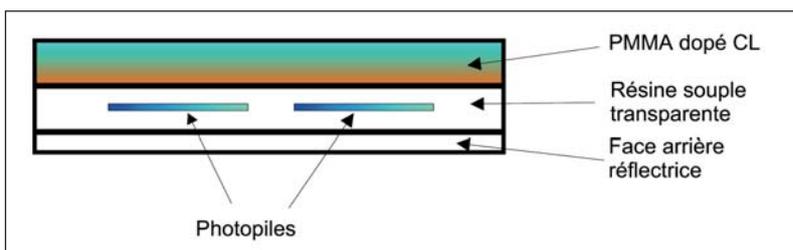
tion de modules photovoltaïques d'une durée de vie supérieure à dix ans, nous disposons d'un recul suffisant. Les modules photovoltaïques réalisés ont répondu à la norme NFC 57100 et aux spécifications des autorités américaines DOE/JPL. Ce type de matériau a permis un gain de production énergétique

d'un facteur 1,2 à 1,4 en fonction des conditions d'éclairage, pour un coefficient de foisonnement de 0,75. Les améliorations sont particulièrement sensibles dans le cas d'un éclairage diffus (e.g. couverture nuageuse), ce qui permet d'améliorer l'efficacité des panneaux solaires dans les régions d'ensoleillement limité.

APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE DES CL AUX PRODUITS VERRIERS

Des développements internes au LPRL et collaboratifs ont permis d'adapter les cascades lumineuses aux produits verriers. La figure 7 présente quelques structures étudiées dans lesquelles des verres et des matrices optiquement actives sont associés.

Figure 6 : vue en coupe de la structure d'un module réalisé selon notre procédé.



EXTENSION DE L'UTILISATION DES CL

Étude de vernis verriers pour applications photovoltaïques. Une autre solution, adaptable aux verres existants, consiste à utiliser des matrices dopées à cascades

Figure 7

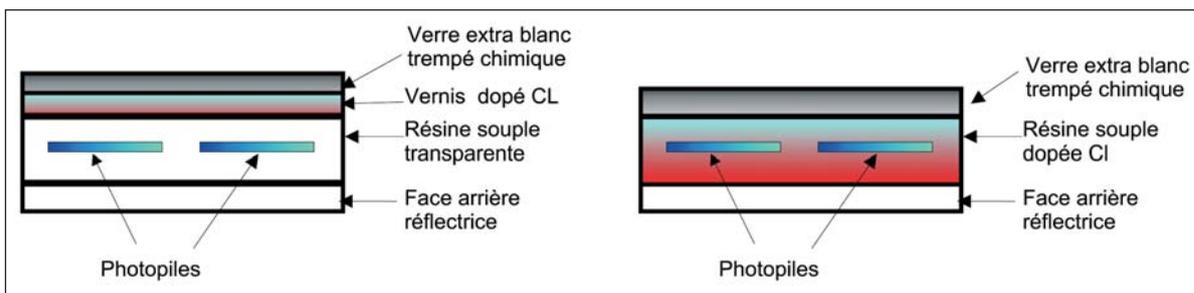
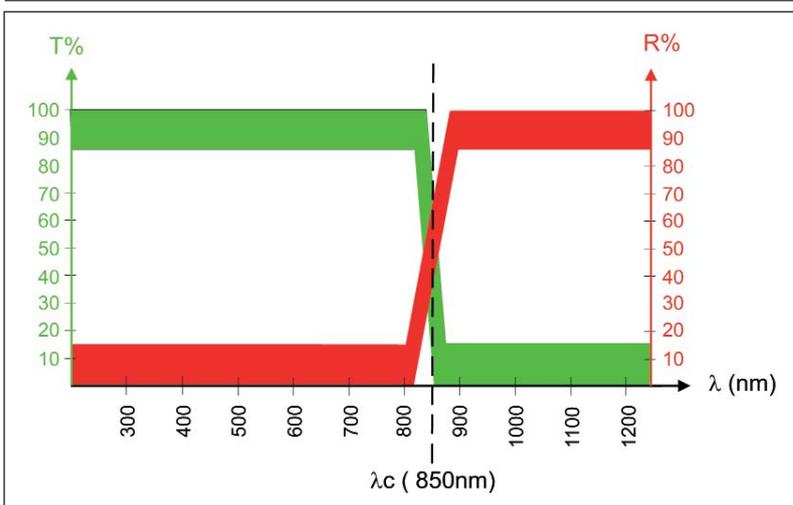


Figure 8 : réponse spectrale d'un verre dichroïque destiné à une CL photovoltaïque



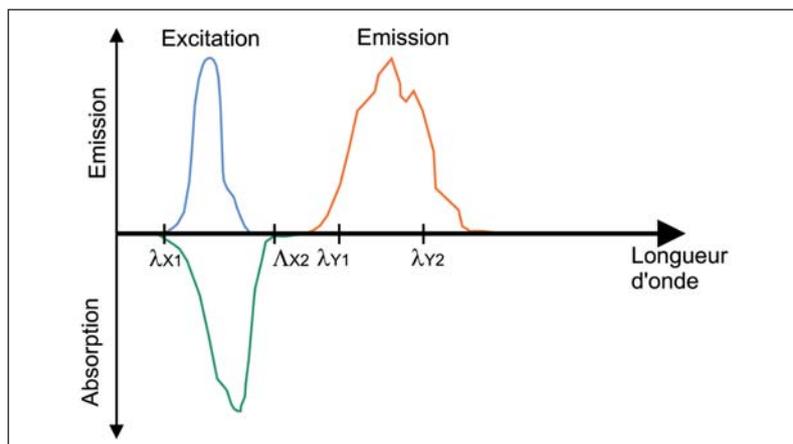
lumineuses applicables par sprays ou laquées. Le LPRL mène actuellement des études d'intégration de matrices CL compatibles avec certaines fonctions optiques, particulières des verres dichroïques. L'utilisation de tels systèmes "opto" associés au photovoltaïque autorise une plus grande production d'énergie photoélectrique par unité de surface active de cellule.

CONCENTRATEUR ÉLECTROMAGNÉTIQUE À CHANGEMENT DE FRÉQUENCE

Principe de fonctionnement

Un concentrateur électromagnétique à changement de fréquence est basé sur l'utilisation conjointe d'une CL et d'un traitement dichroïque. Le principe de fonctionnement est le suivant : Supposons que nous ayons une cascade lumineuse avec les caractéristiques d'absorption/émission donnée par la figure 9. La structure optique est constituée d'un verre orienté du côté de

Figure 9 : spectre d'absorption/émission d'une CL



la source d'excitation, placé au-dessus d'une lame dopée CL, la face arrière étant un réflecteur pur.

Le schéma 11 décrit la structure du matériau et le spectre de transmission et de réflexion du filtre dichroïque.

Le rayonnement d'excitation traverse la lame de verre traitée dichroïque pour être absorbé par la CL, pour être réémis entre λ_{y1} et λ_{y2} . Ce rayonnement de réémission se fait en 4π stéradians, mais du fait de la présence simultanée du réflecteur en face arrière et du coefficient de réflexion élevé du filtre dichroïque entre λ_{y1} et λ_{y2} , le signal de réémission ne peut sortir de la structure que par la sortie optique.

Principe et résultats de mesure

Une fibre optique connectée à un photodétecteur de type SFH 350 est reliée aux matériaux verre CL/dichroïques. Le montage et les caractéristiques de mesures sont donnés par ailleurs.

Les résultats de mesures obtenus avec les différentes structures décrites précédemment, sont repris dans la figure 14. On voit que sous une excitation spécifique donnée aux matériaux à cascades lumineuses traitées dichroïques, les rapports de gain entre les matériaux neutres et dopés varient d'un facteur 5 à 11. Ces résultats expérimentaux ont guidé nos travaux de recherche vers de nouvelles architectures photovoltaïques à rendement élevé sans surcoût notable, du type générateur opto photovoltaïque 3D que nous vous présentons dans les chapitres suivants.

Les "cleantechs" et tout particulièrement le solaire photovoltaïque, sont aujourd'hui en plein essor. Dans ce contexte, d'autres approches optiques et tridimensionnelles du photovoltaïque permettant une concentration sans refroidissement ni suivi du soleil sont également défendues par les compagnies Covalent Solar (MIT,

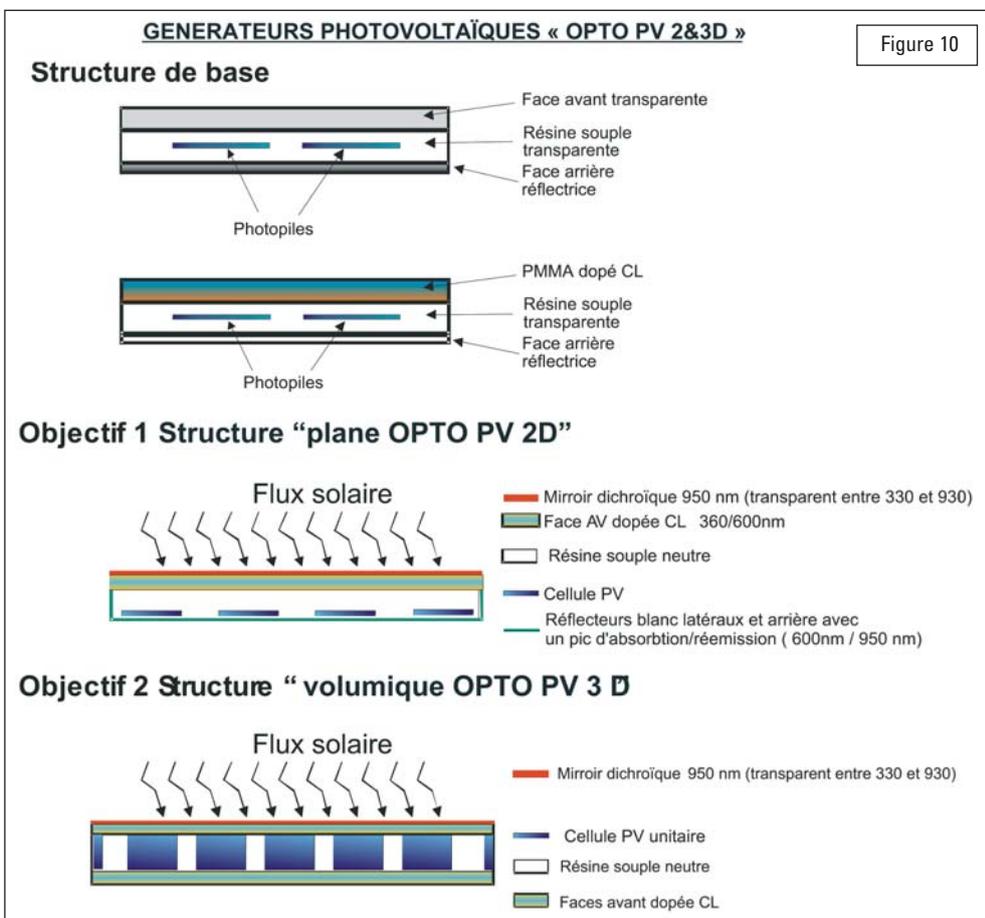


Figure 10

Boston USA), Prism Solar (Highland, NY, USA) qui utilisent des prismes et hologrammes, et Cool Earth Solar (Australie) qui utilise des sphéroïdes gonflés.

DOUBLE VITRAGE "GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE" TYPE OPTO PV 3 D
 Les planches des figures 15 et 16 représentent diverses structures de générateurs photovoltaïques

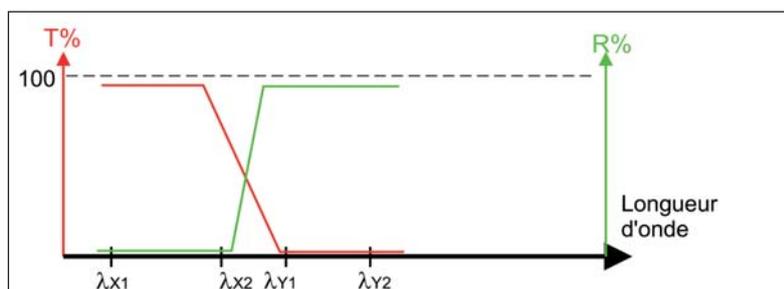


Figure 11a : Spectre de R% et T% du filtre dichroïque

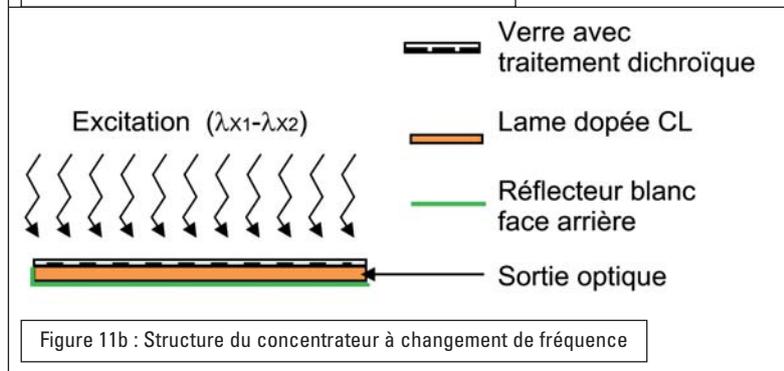
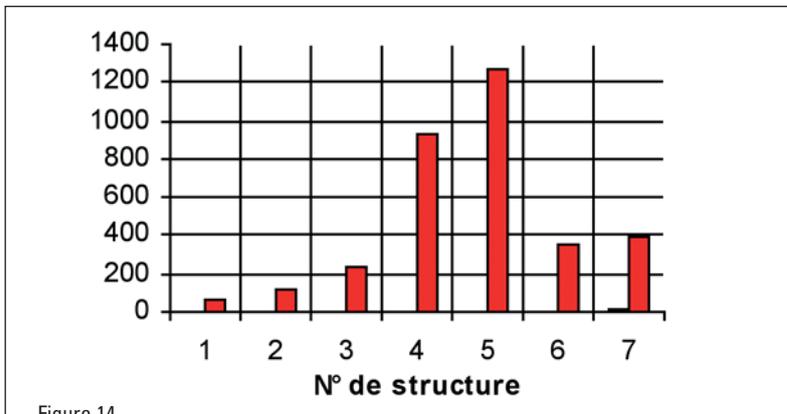
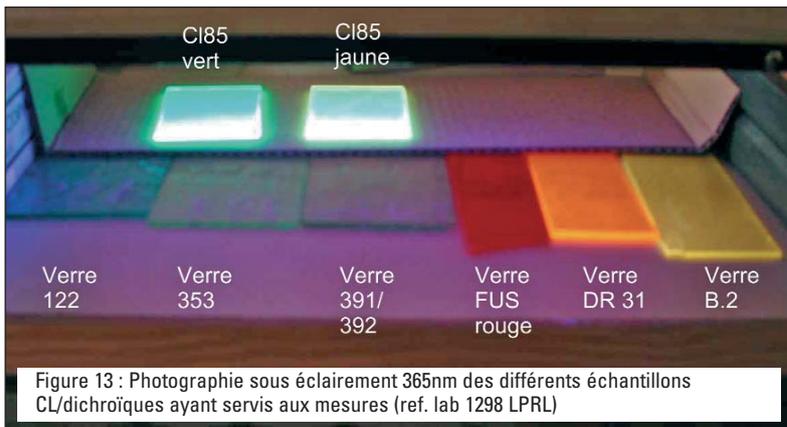
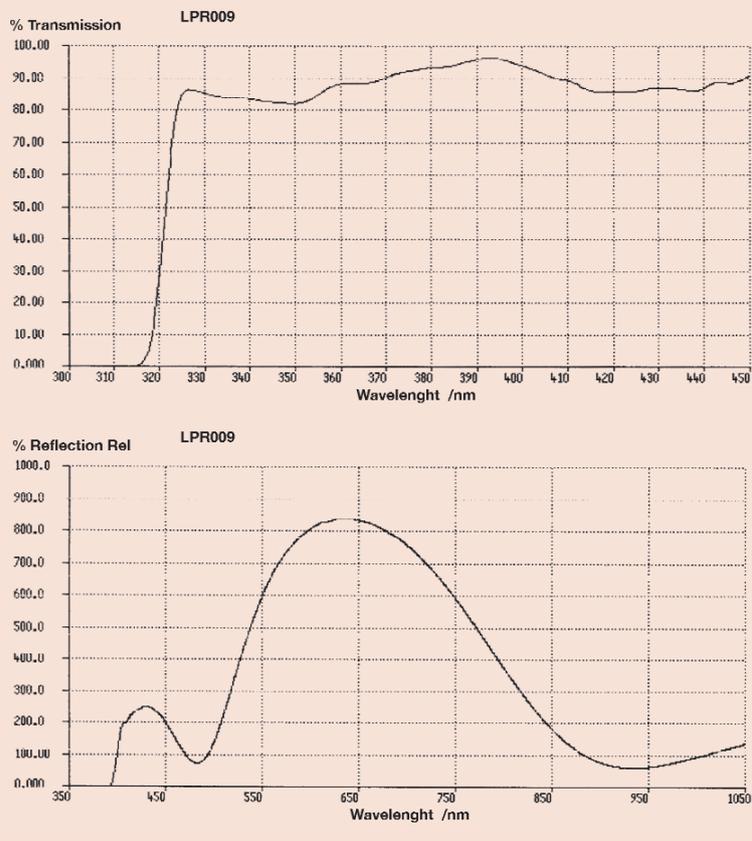


Figure 11b : Structure du concentrateur à changement de fréquence

Démonstrateur de laboratoire, un concentrateur électromagnétique à changement de fréquence avec une cascade lumineuse à base d'oxyde d'yttrium dopé europium. Les courbes de la figure ci-dessous nous donnent les spectres de transmission et de réflexion du filtre dichroïque LPR009.



intégrés dans des doubles vitrages de conception classique ou dans des éléments de construction verre/aluminium de façade pour le bâtiment.

TOURS PHOTOVOLTAÏQUES

Les figures 17, 18 et 19 donnent des exemples de réalisation de systèmes photovoltaïques tridimensionnels Opto PV 3D, mettant en œuvre des matériaux verriers à traitements dichroïques infrarouge, des matrices à cascades lumineuses, des cellules de silicium en dichotomisant les différentes fonctions dans un même générateur :

- Décalage de la fréquence de la lumière en λn par CL et guide d'onde
- Piégeage des photons λn par un réflecteur dichroïque
- Réflexion UV/visible par paroi nord ou support opaque
- Conversion optimale du flux photonique ad hoc en courant continu par les cellules photovoltaïques au silicium.

Dans cette configuration l'architecture Opto PV 3D décrit une structure volumique où les cellules sont placées dans une enceinte parallélépipédique dont les parois en verre sont recouvertes d'un spray cascade lumineuse et d'un traitement dichroïque avec filtre passe bas en longueur d'onde correspondant à la réponse spectrale des cellule silicium.

Il est possible d'empiler plusieurs blocs les uns sur les autres pour constituer un générateur plus puissant.

Il est aussi possible de placer plusieurs groupes de cellules PV dans le même bloc optique pour constituer un générateur PV f2 (figure 19).

Générateur PV OPTO PV 3D et différentes architectures volumiques

La figure 20 présente quelques principes de modules solaires faisant appel à d'autres architectures volumiques, les modules sont introduits dans un volume dont

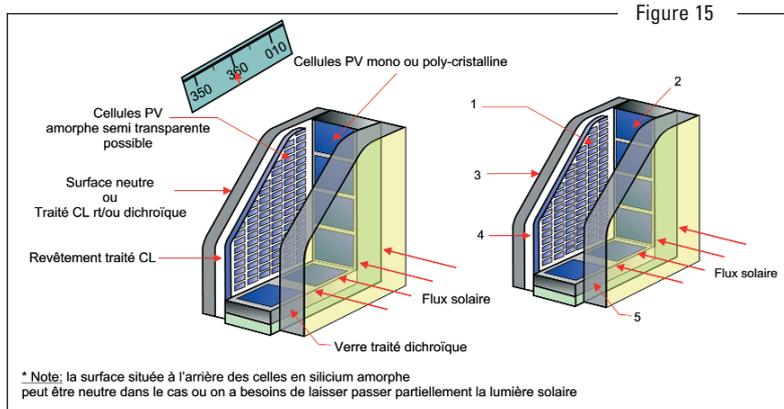
les surfaces sont à cascades lumineuses avec un traitement extérieur constituant un filtre dichroïque ou passe bas (en longueur d'onde) dont la fréquence de coupure dépend du type de cellules PV et de la cascade lumineuse utilisée. On peut considérer que cette fréquence correspond à des longueurs d'onde comprises entre 650 nm et 900 nm selon les cascades lumineuses et la technologie de cellule.

Dans ce type d'architecture de générateurs photovoltaïques Opto PV 3D, il est possible de dichotomiser les différentes fonctions cascade lumineuse, photovoltaïque, réfléchissantes de celle de miroir dichroïque en capsulant les cellules solaires directement dans une matrice CL et en traitant optiquement les parois des verres extérieurs. (figure 21).

Ce type d'architecture volumique autorise un plus grand degré de liberté dans la gestion des différentes fonctions de production d'énergie photovoltaïque. Ainsi on peut privilégier la densité d'énergie fournie par unité de volume ou par unité de surface suivant l'utilisation des cellules. Dans la figure 22, on représente un assemblage en "tour solaire" constituée de plusieurs modules volumiques photovoltaïque permettant d'augmenter la puissance électrique installée tout en gardant une même emprise minimale au sol.

CONCLUSION

Ces développements Opto photovoltaïque 2&3 D représentent les générateurs photovoltaïques du futur où le verre joue un rôle technique et économique équivalent à celui des matériaux semi-conducteurs (cellules photovoltaïques), dont l'expression emblématique réside dans la notion de "tour solaire", dès maintenant réalisable. ■



* Note: la surface située à l'arrière des cellules en silicium amorphe peut être neutre dans le cas où on a besoin de laisser passer partiellement la lumière solaire

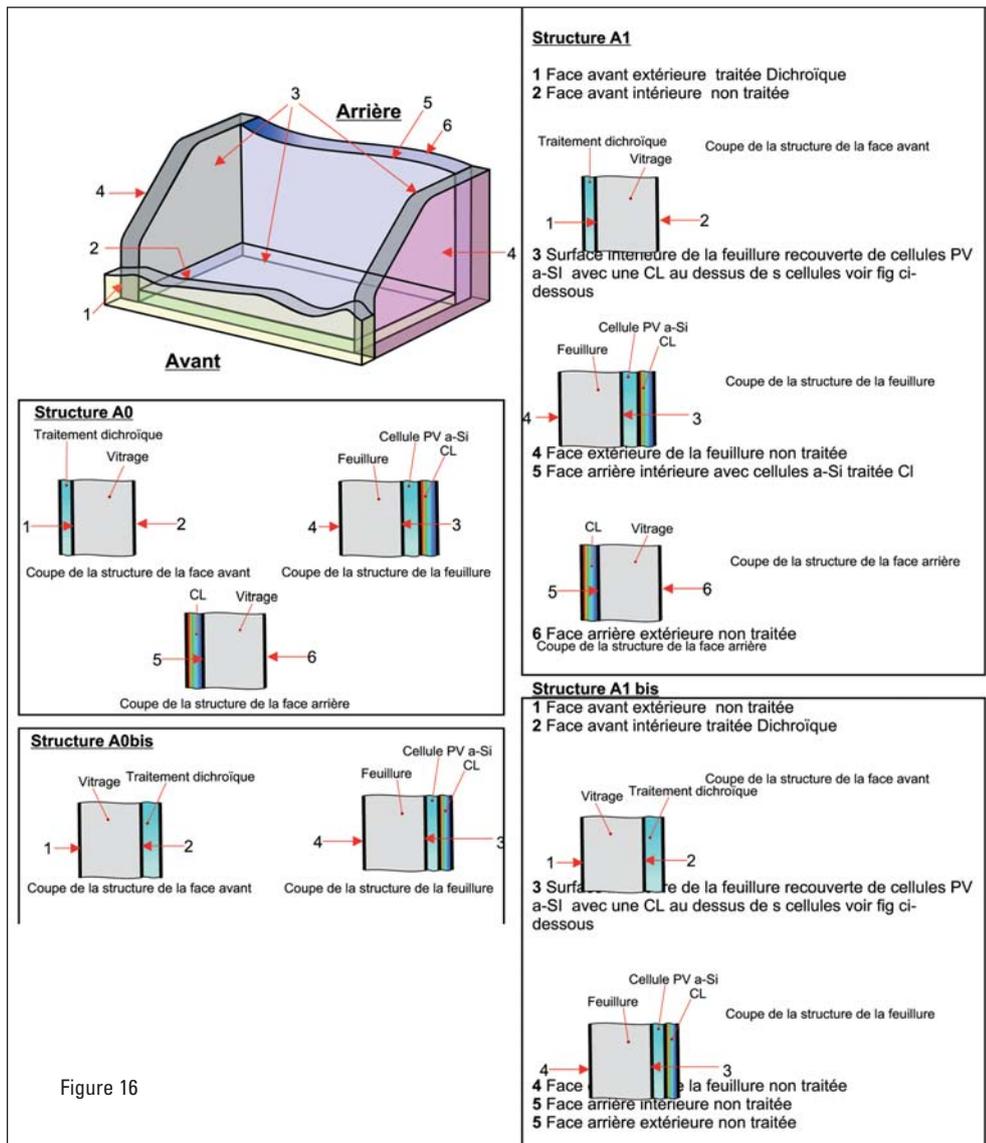


Figure 16

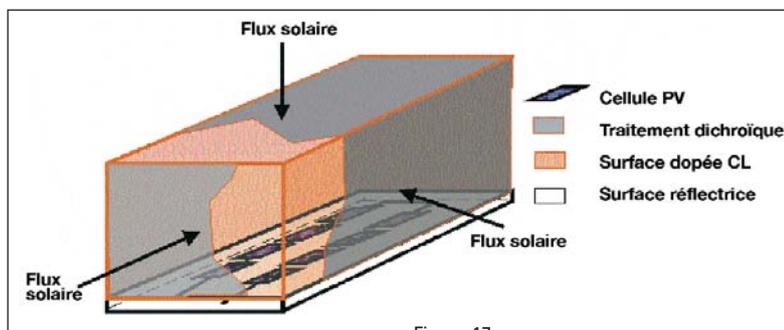


Figure 17

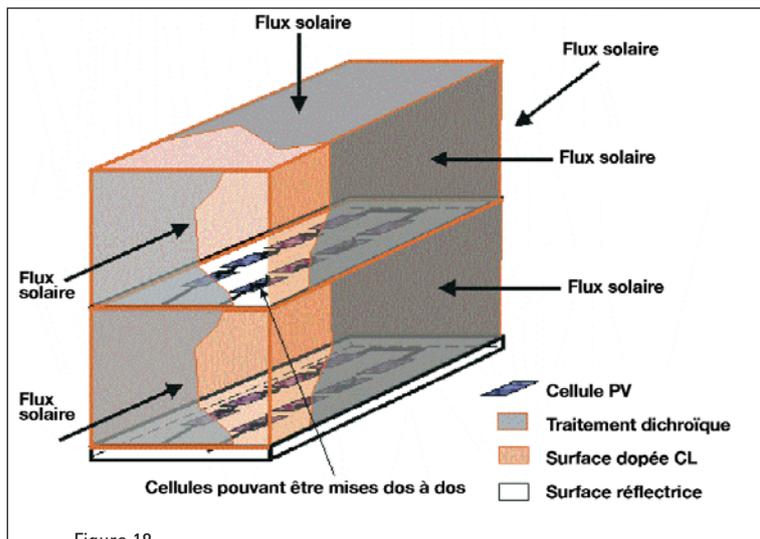


Figure 18

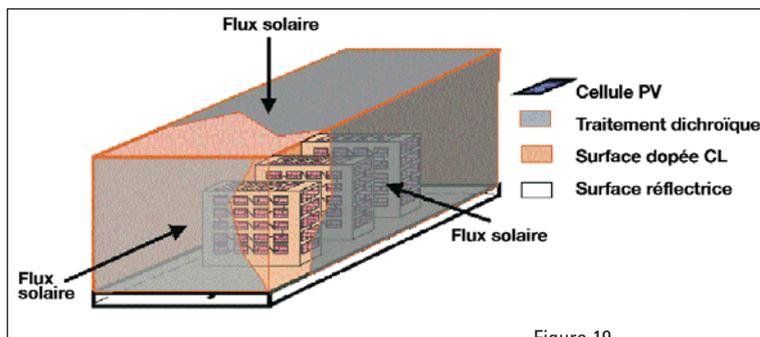


Figure 19

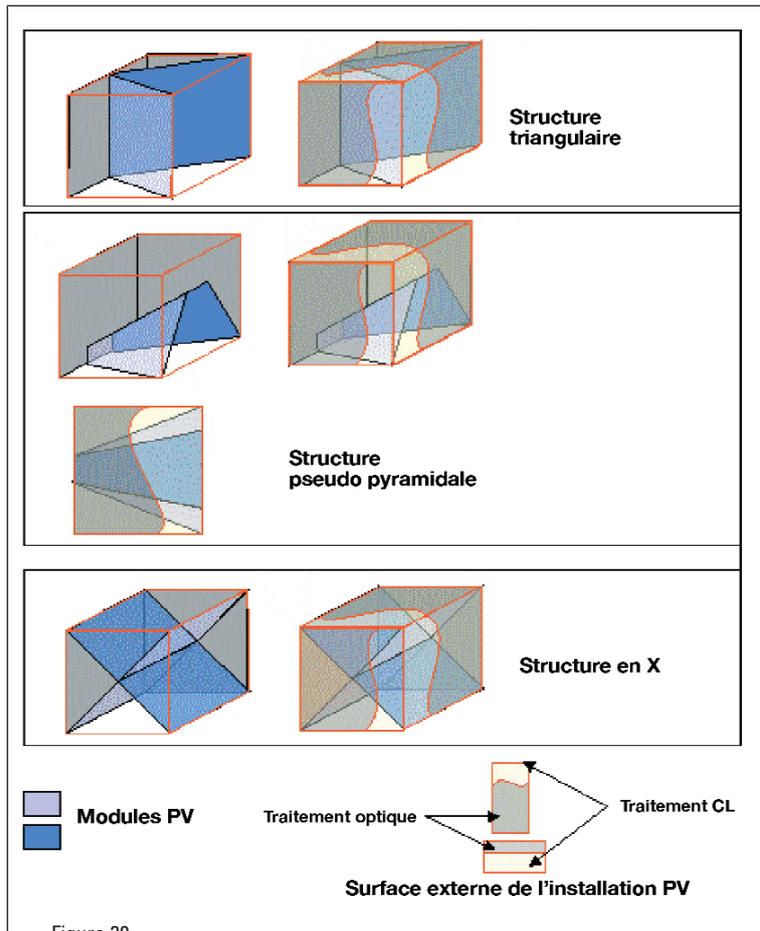


Figure 20

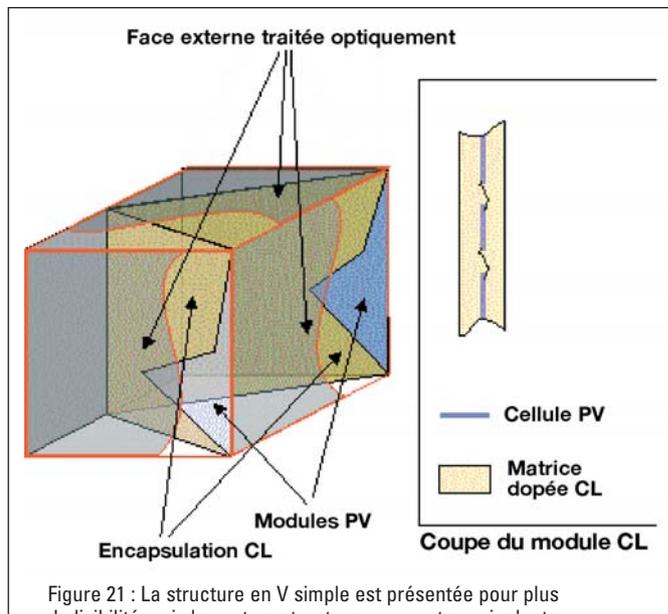


Figure 21 : La structure en V simple est présentée pour plus de lisibilité mais les autres structures peuvent aussi adopter la dissociation de la fonction CL et la fonction traitement optique

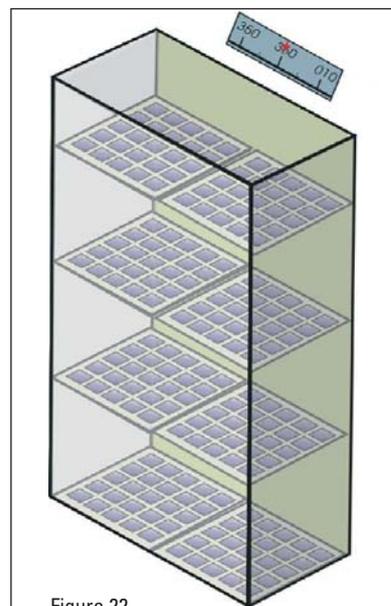


Figure 22

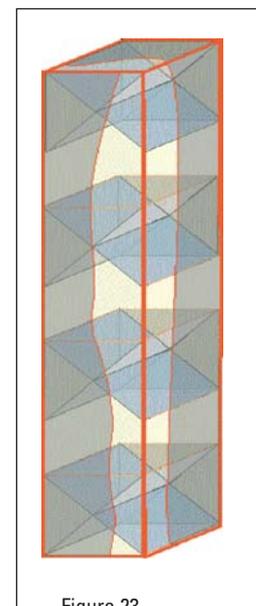


Figure 23

RÉFÉRENCES

- [1] P. Gravisse, M. Prevot, "Photovoltaic device with luminescent layers of differing composition", US Patent 3,912,931 filed June 14th 1974
- [2] P. Gravisse, "Solar radiation concentrators" US Patent 4,324,946 filed March 9th 1978
- [3] W.G. Van Sark, K.W. Barnham, L.H. Slooff, A.J. Chatten, A. Büchtemann, A. Meyer, S.J. Mc.Cormack, R. Koole, D.J. Farrell, R. Bose, E.E. Bende, A.R. Burgers, T. Budel, J. Quilitz, M. Kennedy, T. Meyer, S.H. Wadman, G.P. van Klink, G. van Koten, A. Meijerink, D. Vanmaekelbergh, "Luminescent Solar Concentrators – A review of recent results," Optics Express 16, 2008, p. 21773-21792
- [4] A. Goetzberger, W. Greubel, "Solar Energy Conversion with Fluorescent Collectors," Appl. Phys. 14(1977), p. 123-139
- [5] A. Goetzberger, V. Petrova-Koch, "High-Efficient Low-Cost Photovoltaics: Recent Developments" Technology & Engineering editor, 2008
- [6] P. Gravisse, F. Le Poull, "Conversion of solar radiation by fluorescence - Application to the encapsulation of cells", Solar Cells, 4(1981), p. 25-35
- [7] M.J. Currie, J.K. Mapel, T.D. Heidel, S. Goffri, M.A. Baldot, MIT, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139 "High-Efficiency Organic Solar Concentrators for Photovoltaics" Science, 321(2008), 11
- [8] P. Gravisse, M. Schiffmann, LPRL, "Photovoltaic generators with light cascade and varying electromagnetic flux" United States Patent, US 6,570,083 B3 May 27, 2003
- [9] LPRL and al., "Cascades lumineuses et nanoparticules optiquement actives NOA" Brevet EU, N°INPI 09/00637 du 12/02/2009
- [10] LPRL and al., "Générateurs OPTO PV 3D" Brevet EU, N° INPI 09/00635 du 12/02/2009
- [11] A. Garnier, "le verre : un matériau de choix pour la technologie photovoltaïque", Verre, 6(2008), p. 22-29