

Rapport final avril 2004

N° du projet : 100296
N° de la décision : 150368

Étude et amélioration de la fiabilité des cellules solaires sur substrats polymères

Rédigé par:
Diego Fischer, Yvan Ziegler, Alexandre Closset
VHF-Technologies SA
Av. des Sports 18, 1400 Yverdon-les-Bains



Mandataire principal:



VHF-Technologies SA
Av. des Sports 18
1400 Yverdon-les-Bains

Personne de contact:
Alexandre Closset
+41 24 423 04 91
alexandre.closset@flexcell.ch

Partenaire du projet:



EIAJ (Ecole d'Ingénieurs de l'Arc Jurassien)
7 av. de l'Hôtel-de-ville
2400 Le Locle

Personne de contact:
Prof. Dr. Herbert Keppner
+41 32 930 3845
keppner@eicn.ch

Consultant scientifique:



Dr. Pierangelo Gröning
Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA)
Feuerwerkerstrasse 39
CH-3602 Thun, Switzerland
Tel. ++41 33 228 52 15
Fax ++41 33 228 44 90
Pierangelo.Groening@empa.ch

Summary

Entering the marketing phase of flexible photovoltaic cells deposited on polyimide, VHF-Technologies must still ensure the long-term reliability of its product. Indeed, at the time of the preliminary tests of accelerated degradation (thermal cycles from -40 to +85 C), the performance of the cells not only decreased, but adhesion problems were also observed (cracks, partial separation, even total in certain cases).

In order to solve this delicate problem, a literature research as well as a discussion with a specialist on the matter gave us not other options but to explore several ways simultaneously:

- To improve metal adhesion on polyimide, this by first of all, integrating a stage of vacuum degassing of polyimide film, then by carrying out a conditioning of surface using an Ar-plasma treatment, possibly Ar/O₂ and finally by carrying out a metallization by sputtering cathode instead of evaporation.
- To prevent water absorption in polyimide by depositing a diffusion barrier in the form of dense and hydrophobic thin films.
- To reduce the mechanical stress of the thin silicon layers by the adaptation of the dilation coefficients thermal of the contact layers.

This project made it possible to complete following work:

- Adaptation of a deposition system (initially envisaged for the deposition of the top contact only) in order to carry out the degasification phases, plasma treatment and metal deposition by cathode sputtering.
- Structuring of PVD metallization in form of parallel bands isolated one from each other, realized by a lift-off process first by manual access, and then by machine. Obtaining production outputs (yield) equivalent to those obtained before on metallized films and structured in subcontracting.
- Improvement of existing equipment in order to integrate the substrate metallization in a controlled process (reduction of the defects caused in particular by dust).

From this various work it results in particular the following result:

- Establishment of a metallization process enabling better adhesion and an increased stability of the electric performances after accelerated degradation.
- Resumption of production of solar cells and modules on the basis of this new process.

This first step of reliability improvement enabled us to start a pilot production; however, a continual effort must be provided in order to stabilize the process completely and to make it economically viable. The concept reliability and low production cost are crucial so that VHF-Technologies SA can achieve its real goal, i.e. to produce powerful photovoltaic panels for outdoor applications.

Résumé

Entrant dans la phase de commercialisation de cellules photovoltaïques souples déposées sur polyimide, VHF-Technologies doit encore assurer la fiabilité à long terme de son produit. En effet, lors des tests préliminaires de dégradation accélérée (cycles thermiques de -40 à $+85$ C), la performance des cellules a non seulement diminué, mais des problèmes d'adhésion ont également été observés (fissures, décollement partiel, voire total dans certains cas)

Afin de résoudre ce délicat problème, une recherche littéraire ainsi qu'une discussion avec un spécialiste en la matière nous contraint d'explorer plusieurs voies simultanément:

- Améliorer l'adhésion du métal sur le polyimide, ceci en intégrant tout d'abord une étape de dégazage sous vide du film polyimide, puis en effectuant un conditionnement de la surface à l'aide d'un traitement plasma Ar, éventuellement Ar/O₂ et finalement en effectuant une métallisation par pulvérisation cathodique au lieu de l'évaporation.
- Empêcher l'absorption d'eau dans le polyimide en déposant une barrière de diffusion sous forme de films minces denses et hydrophobes.
- Réduire le stress mécanique des couches minces de silicium par l'adaptation des coefficients de dilatation thermique des couches de contact et par l'introduction d'un contre-stress sur la face arrière du substrat.

Ce projet a permis de réaliser les travaux suivants:

- Adaptation d'un système de dépôt (initialement prévu pour le dépôt du contact supérieur uniquement) afin d'effectuer les phases de dégazage, de traitement plasma et les dépôts métalliques par pulvérisation cathodique.
- Structuration de la métallisation PVD en forme de bandes parallèles isolés l'une de l'autre réalisée par un processus de lift-off d'abord manuel, et puis par machine. Obtention de rendements de production (yield) équivalents à ceux auparavant obtenu sur des films métallisés et structurés en sous-traitance
- Amélioration d'équipements existants afin d'intégrer la métallisation du substrat dans un processus maîtrisé (réduction des défauts provoqués notamment par la poussière).

De ces divers travaux il en découle notamment le résultat suivant:

- Etablissement d'un processus de métallisation avec un faible taux de décollement et une stabilité accrue des performances électriques après dégradation accélérée.
- Reprise de la production de cellules et modules solaires sur la base de ce nouveau procédé.

Ce premier programme d'amélioration de la fiabilité nous a permis de démarrer une production pilote; cependant, un effort continu doit être fourni afin de stabiliser totalement le procédé et pour le rendre économiquement viable. Le concept fiabilité et faible coût de production est crucial pour que VHF-Technologies SA puisse atteindre son réel objectif, c'est-à-dire de produire des panneaux photovoltaïques de puissance pour des applications extérieures.

Table des matières

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Situation initiale | 6 |
| 2 | Organisation du projet..... | 8 |
| 3 | Méthodologie | 9 |
| 3.1 | Cycle thermique | 9 |
| 3.2 | Mesure de la force d'adhésion | 12 |
| 3.2.1 | Préparation des échantillons..... | 12 |
| 3.2.2 | Méthode : | 12 |
| 4 | Résultats | 14 |
| 4.1 | Tâche 1A: Métallisation par PVD..... | 14 |
| 4.2 | Tâche 1B: Utilisation d'autres types et sources de polyimide..... | 15 |
| 4.3 | Tâche 1C: Mesure directe de la force d'adhésion | 18 |
| 4.3.1 | Résultats | 18 |
| 4.3.2 | Conclusion..... | 21 |
| 4.4 | Tâche 2: Réduction des défauts induits par la poussière..... | 22 |
| 4.5 | Tâche 3: Structuration du métal | 23 |
| 4.6 | Tâche 4: Traitements par plasma & couches d'adhésion..... | 26 |
| 4.7 | Tâche 5: Dégazage du substrat polyimide..... | 28 |
| 4.8 | Tâche 6: Barrières de diffusion | 29 |
| 4.9 | Tâche 7: réduction du stress par l'adaptation des contacts métal et TCO | 30 |
| 4.10 | Tâche 8 | 31 |
| 4.11 | Tâche 9 | 31 |
| 5 | Conclusions du projet..... | 32 |
| 6 | Références | 35 |
| 7 | Annexe: Données des tests de cyclage thermique..... | 36 |

1 Situation initiale

A la fin de l'année 2002, des modules tests produits par VHF-Technologies ont été placés à l'extérieur et également en cycle thermique (-40 à +85 C); dans les 2 cas plusieurs modules ont subi une délamination relativement sévère. Il est à noter que ce phénomène intervient généralement lorsque le module subit une relativement grande variation de température. La Figure 1 montre un prototype de parafoudre électronique après avoir été placé plusieurs semaines à l'extérieur et sur lequel on a observé un effet de délamination. La Figure 2 montre un agrandissement d'une zone fortement délaminée après avoir subi un grand nombre de cycles thermiques en chambre climatique.

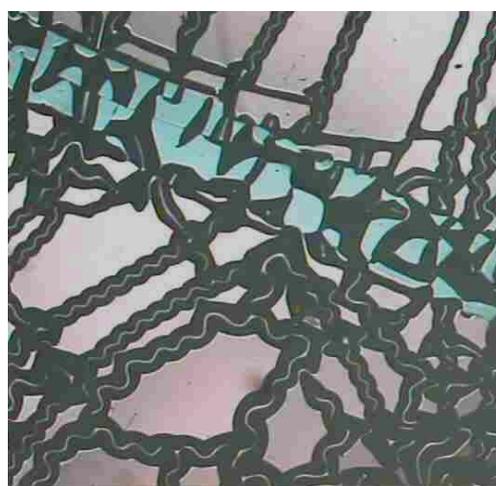


Figure 1: Parafoudre électronique équipé de cellules flexibles de VHF-Technologies sur lequel un effet de délamination a été observé à la fin de l'année 2002.

Figure 2: Photo microscopique d'une zone de 3x3 mm fortement délaminée, après 270 cycles -40..+85C @ 85% RH (polyimide métallisé par Steiner GmbH).

Les premières analyses ont rapidement montré que le phénomène observé était causé par une perte d'adhésion entre le substrat polyimide et la couche d'aluminium servant de contact électrique arrière (Figure 3).

Dès le début de ses activités, VHF-Technologies a sous-traité le dépôt ainsi que la structuration du métal faisant office de contact arrière; en effet, la mise en série des cellules nécessite que le substrat soit constituée de bandes métalliques parallèles séparée par une étroite zone non-métallisée (env. 0.3mm), comme le montre la Figure 24. Deux sous-traitants ont été retenus pour cette opération, chacun ayant sa propre technologie en ce qui concerne la structuration.

Cependant, le problème de délamination est apparu sur la métallisation réalisée par les deux fournisseurs, avec toutefois une phénoménologie différente: dans un cas, la délamination suivait des longues lignes serpentes (Figure 2), dans l'autre cas, la délamination était des tâches compactes de pelage complet (Figure 4).

Dans un premier temps, le problème a été discuté avec les sous-traitants. L'un a tenté un essai en changeant certains paramètres (couche d'accrochage avant la métallisation), mais aucune

amélioration n'a pu être mise en évidence. Quant à la seconde source, aucune solution technique n'a été proposée.

Notons que les sous-traitants n'avaient aucune réelle expérience dans le domaine du traitement de substrats pour des applications telles que les cellules solaires en couches minces. L'un effectue une métallisation aluminium pour des condensateurs, l'autre pour des circuits imprimés flexibles. Dans les deux cas, les contraintes mécaniques n'ont rien de comparable par rapport à ce qui est imposé tout d'abord par notre procédé (dépôt à 200°C de couches de silicium fortement stressées) et ensuite par l'application elle-même qui est soumise à certaines normes (cycle thermique de -40 à $+85^{\circ}\text{C}$ norme photovoltaïque CEI 61646).

Réalisant la gravité du problème et se trouvant confronté au fait que les sous-traitants n'envisageaient pas de se lancer dans un nouveau développement, il a été décidé de réaliser la métallisation ainsi que la structuration à l'interne. Mais un tel développement nécessite d'importantes ressources humaines et financières, qu'une entreprise à l'état de Start-up ne peut pas assumer seule, raison pour laquelle nous avons dû demander le soutien de l'OFEN.

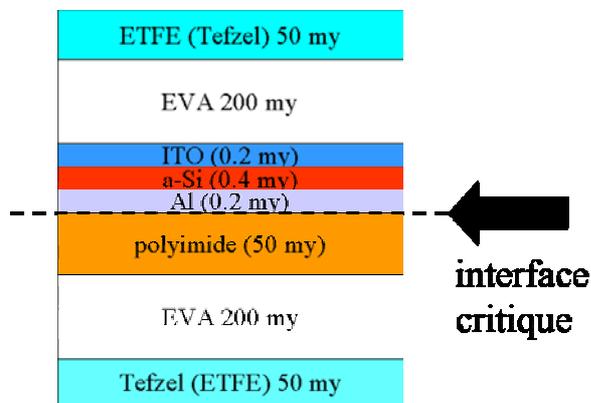


Figure 3: Structure des modules PV flexibles de VHF-Technologies SA.

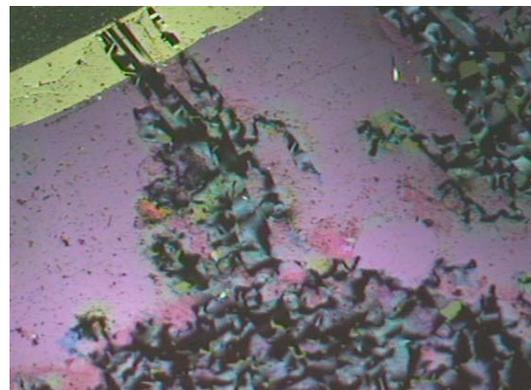


Figure 4: Délamination présentant des taches de pelage complet (métallisation par Hueck GesmbH)

2 Organisation du projet

Suite aux investigations préliminaires, l'étude de la littérature spécialisée et des discussions avec différents experts, la recherche de la solution du problème d'adhésion a été subdivisée en trois filières correspondant aux milestones définis dans la requête:

Milestone 1: l'objectif est l'amélioration directe de l'adhésion du métal sur le substrat. C'est l'approche la plus directe et confirmée par M. Groening de l'EMPA ; l'effort devra donc principalement être dirigé vers le conditionnement et la préparation de la surface du substrat avant le dépôt, par l'intermédiaire de traitements plasma et des couches d'accrochage (Tâche 4). Suite aux conseils de M. Groening, deux nouvelles tâches 1B et 1C ont également été introduites dans le but d'évaluer différentes sources de polyimide et leur impact respectif sur l'adhésion (1B), ainsi que de faire des mesures directes de la force d'adhésion du métal sur le substrat (1C).

Tâche 1A: métallisation du polyimide par pulvérisation cathodique (PVD) à l'interne de VHF

Tâche 1B: évaluation de différentes sources de polyimide

Tâche 1C: mesure directe de la force d'adhésion du métal sur le polyimide

Tâche 2: réduction des défauts induits par la poussière

Tâche 3: processus de structuration du métal par lift-off

Tâche 4: traitements plasma / couches d'adhésion en combinaison avec la métallisation PVD

Milestone 2: Il s'agit de réduire l'absorption de l'eau dans le polyimide pendant et après la fabrication du module. Cette approche est motivée par le fait qu'une délamination a pu être observée si des échantillons présentant une faible adhésion initiale étaient simplement exposés à une humidité élevée. Suite à la discussion avec M. Groening, l'importance de ce paramètre doit être relativisée, car selon son expérience un taux d'humidité inférieur à 60% ne devrait pas altérer l'adhésion du film. Néanmoins, suite à des discussions avec les fabricants de polyimide, il est préférable de réduire au maximum la concentration d'eau pendant le processus de métallisation afin de garantir une certaine adhésion (Tâche 5).

Tâche 5: dégazage du substrat par traitement thermique

Tâche 6: encapsulation bifaciale du substrat polyimide

Milestone 3: cette étape consiste à réduire le stress mécanique dans le but de réduire les forces agissant sur les interfaces de faible adhésion. Notons cependant que notre marge de manœuvre est très réduite, car la structure de la cellule utilisée n'offre pratiquement pas de degrés de liberté en terme de changements de matériaux et d'épaisseurs.

Tâche 7: réduction du stress par l'adaptation des contacts métal et TCO

(Tâche 8: abandonnée suite au recommandation de M. Groening)

Tâche 9: influence de l'encapsulation sur l'adhésion

3 Méthodologie

3.1 Cycle thermique

Un des problèmes principaux de la fiabilité à long terme est de déterminer le ou les tests accélérés pouvant simuler les diverses conditions d'utilisation et climatiques auxquelles le produit va être confronté. Il est bien évident que cette recherche n'entre pas dans le cadre de ce projet, c'est pourquoi nous avons décidé de nous rapporter à certains tests de la norme CEI 61646 (Ref 11) qui est utilisée pour les modules photovoltaïques conventionnels.

Les effets de délaminations observés préliminairement apparaissent essentiellement lorsque les modules subissent des variations de température, nous avons adapté le test de cycle thermique de la norme à notre installation (Figure 5). En effet, la chambre climatique mise à disposition par l'EICN ne comporte pas de régulation d'humidité, nous avons donc opté pour une humidité saturée au maximum grâce à un bac d'eau ouvert dans l'enceinte. Cette condition est différente et plus sévère que la norme qui préconise une humidité relative constante de 90%. Dans notre cas, nous avons observé d'importantes formations de givre et de glace pendant les températures négatives du cycle.

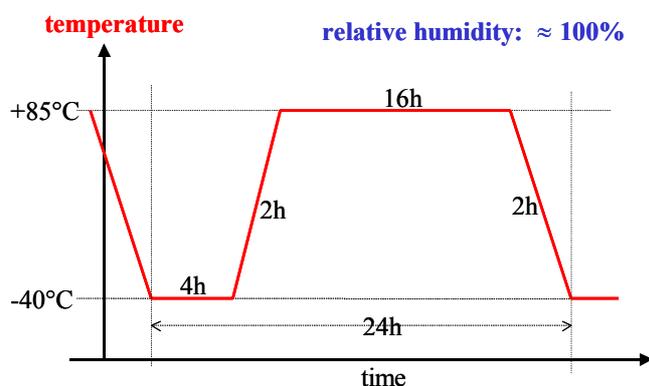


Figure 5: Cycle de température appliqué pour le test des modules de référence. Ce cycle s'approche de la norme CEI61646 pour la qualification des modules photovoltaïques en couches minces.



Figure 6: Chambre de cycle thermique "Vötsch" de l'EICN. Une humidité saturée est réalisée par la présence d'un bac d'eau ouvert dans l'enceinte.

Effet de l'humidité sur la délamination :

Une simple expérience a permis de montrer que l'humidité lors du cyclage est effectivement à l'origine de la délamination (Figure 7).

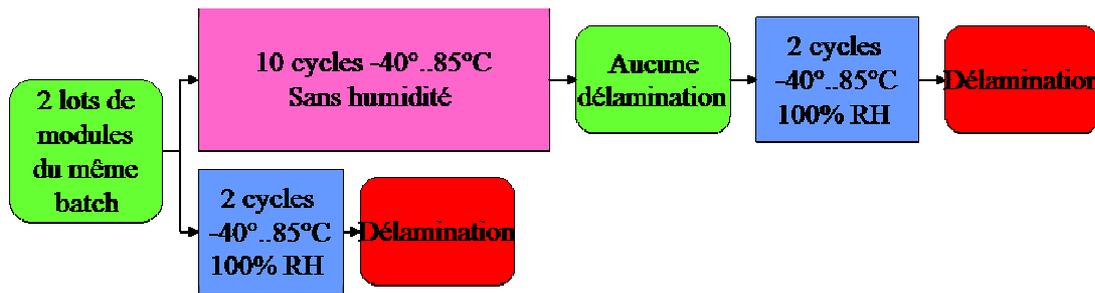


Figure 7: Expérience pour démontrer l'importance de l'humidité sur l'effet de délamination

Au début du projet, les phénomènes de délamination étaient tels qu'il suffisait d'exposer un seul échantillon au cycle thermique pour apprécier l'amélioration d'une modification du procédé. Cependant, les rapides progrès au niveau de la métallisation par pulvérisation cathodique réalisés par VHF-Technologies ont contraint à devoir analyser plusieurs échantillons du même lot, car le phénomène de délamination n'était plus général, mais distribué. Il a donc fallu mettre en place une procédure d'analyse statistique afin d'évaluer l'impact d'un changement de paramètre sur l'adhésion. Tenant compte de la capacité limitée de l'enceinte de cycles thermiques et du temps de travail nécessaire pour chaque essai, une série d'environ 30 modules ayant une surface active de 50mm x 50mm a été défini comme standard.

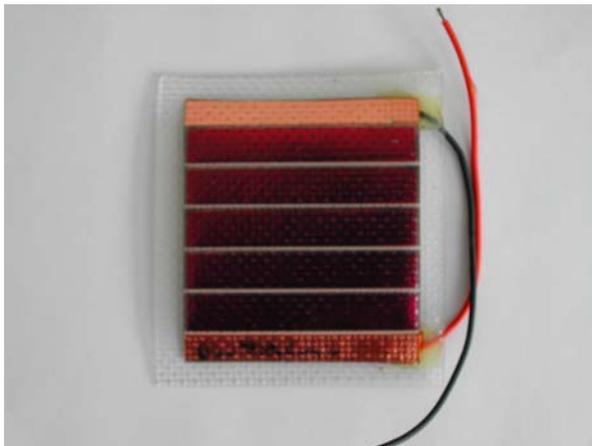


Figure 8: Module test ayant une surface active de 50mm x 50mm et composé de 5 cellules nip en série.

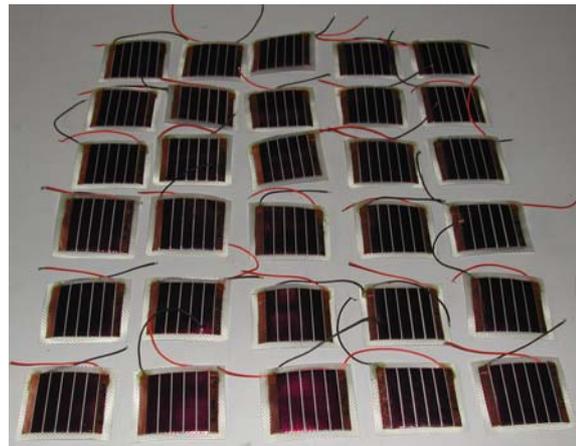


Figure 9: Lot de 30 modules tests prêts pour l'inspection visuelle après 10 cycles thermiques

Pour chaque essai d'amélioration de l'adhésion du présent projet, un lot de modules tests a été fabriqué et testé selon la procédure suivante:

- | |
|--|
| 1. Mesure des courbes JV (puissance initiale) |
| 2. 2 cycles thermiques de 24 h |
| 3. Mesures des courbes JV (puissance après 2 cycles) |

| |
|---|
| 4. Inspection visuelle des défauts à la loupe horlogère (pelages après 2 cycles) |
| 5. 8 cycles de température de 24 h |
| 6. Mesures des courbes JV (puissance après 10 cycles) |
| 7. Inspection visuelle et comptage des défauts à la loupe horlogère (pelages après 10 cycles) |

Tableau 1: Procédure de test pour les lots de modules tests

La comparaison des résultats après 2 cycles et 10 cycles montre que généralement près de la moitié des défauts comptés après 10 cycles apparaissaient déjà après 2 cycles. Dans l'analyse et la comparaison finale, les deux paramètres principaux retenus sont:

- A) le pourcentage de modules présentant au moins un pelage local après 10 cycles
- B) la puissance électrique moyenne restante après 10 cycles par rapport à la puissance électrique initiale (puissance relative)

Dans une deuxième phase du projet, au lieu de produire et tester des grands lots de petits modules, nous avons adopté un nouveau standard de test, comprenant 1 à 3 modules de taille A4 (20 cm x 30 cm). Ces modules nécessitent moins de travail de fabrication et facilitent aussi la logistique des expériences. Ces modules étaient cyclés et observés de la même manière que les petits modules. 1 module A4 correspondant à $4 \times 6 = 24$ modules de petite surface, le test d'un module A4 représente donc approximativement un ancien lot de 30 petits modules en terme de la surface à observer visuellement et aussi en terme de la puissance électrique mesurée au simulateur solaire.

3.2 Mesure de la force d'adhésion

La procédure globale basée sur l'analyse statistique de lots de modules semble assez lourde, mais elle a l'avantage d'être très proche de la réalité du problème.

Un test plus simple et plus rapide est l'évaluation quantitative directe de l'adhésion de l'interface polyimide-métal. Un des sous-traitants pour la métallisation avait effectué de telles mesures et les résultats obtenus (1N/mm) devaient théoriquement convenir à notre application. Selon M. Groening, il semble que les tests d'arrachage sont utiles afin de distinguer entre les modes de fracture cohésive ou adhésive et également pour se situer par rapport aux standards de l'industrie des PCB et l'industrie des plastiques d'emballage. De plus, une analyse en fonction du temps de vieillissement devrait permettre de détecter le cas favorable d'une adhésion croissante avec le temps (Ref 10).

Dans le présent projet nous avons mis au point et appliqué une méthode simple de mesure de la force d'adhésion de l'interface métal-substrat. Elle est décrite ci-dessous :

3.2.1 Préparation des échantillons

Les échantillons sont préparés en laminant plusieurs couches de PET autoadhésives de 30 μm d'épaisseur. La température de lamination était de 150°C et le temps de 1 min. Des bandes de 18 mm ont ensuite été découpées pour la mesure de traction mécanique

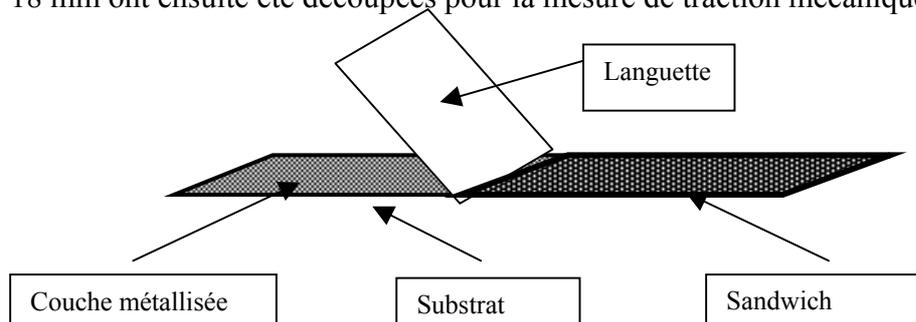


Figure 10: Échantillons pour le mesure de la force d'adhésion substrat-métal

3.2.2 Méthode :

Les mesures ont été effectuées au moyen de la machine Schenk , Trebel M 1600. Les valeurs mesurées ont été transférées sur ordinateur et présentées sous forme de tableaux et de graphiques Excel (force de traction en ordonnée et déplacement en abscisse). La géométrie de mesure du pelage est une traction à 180° avec l'échantillon disposé en T (Figure 11). La vitesse de traction a été choisie à 50 mm/min. Un pelage d'environ 1 cm est effectué sur chaque échantillon par traction manuelle avant la fixation de celui-ci sur la machine.

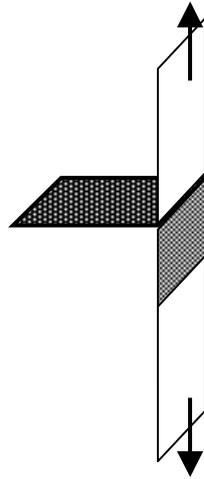


Figure 11: Géométrie de l'échantillon lors de la mesure dans la machine de traction

4 Résultats

4.1 Tâche 1A: Métallisation par PVD

Le système de pulvérisation cathodique servant à déposer la couche ITO (contact supérieur) a été modifié pour le dépôt du contact arrière métallique. Cela a consisté à installer deux cathodes supplémentaires, une pour l'aluminium, l'autre pour la couche d'accrochage qui est indispensable pour obtenir une adhésion raisonnable de l'aluminium sur le polyimide (Ref 1, Ref 3, Ref 4, Ref 7).

Il est également nécessaire de dégazer le film polyimide avant la métallisation (Ref 8); pour ceci, nous avons dû concevoir et réaliser un système de chauffage par infrarouge pour atteindre des températures de 250 à 300°C.

Enfin, l'installation a été équipée avec une électrode RF linéaire permettant d'effectuer des traitements plasma d'argon sur le film avant le dépôt de films métalliques ; cette étape est un point clé pour augmenter l'adhésion des métaux sur des films plastiques (Ref 1, Ref 3, Ref 4, Ref 7, Ref 8).

Le Tableau 2 reporte l'ensemble des équipements du système PVD.



Figure 12: Machine de pulvérisation cathodique (PVD) roll-to-roll

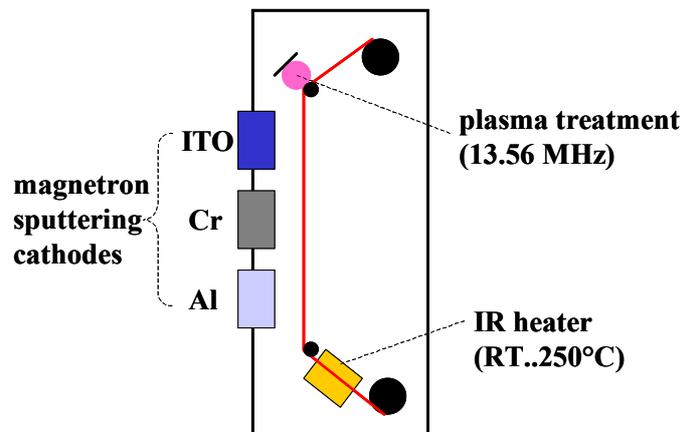


Figure 13: Schéma de principe de la machine de pulvérisation cathodique

| | |
|--------------------------|---|
| Dimension du film: | largeur: 315mm, longueur jusqu'à 300m (épaisseur 50 μm) |
| Transport | moteurs Infranor, bi-directionnel, 0.01-10 t/min |
| Taille des cathodes | 400mm x 120mm |
| Magnétron cathode 1 | Aluminium ou argent |
| Magnétron cathode 2: | Chrome ou acier inox |
| Magnétron cathode 3: | ITO ou ZnO:Al |
| Pompage | Turbo moléculaire/primaire |
| Vide limite | 10^{-6} mBar |
| Générateur de puissance: | 3 kW, continu ou pulsé |
| Chauffage: | infrarouge, RT à 250°C |

| | |
|----------------------------|---------------------|
| Traitement plasma/gravure: | RF 13.56 MHz, 200 W |
| Gas: | Ar, Ar/O2 |
| Commande | Labview |

Tableau 2: Equipements du système PVD

4.2 Tâche 1B: Utilisation d'autres types et sources de polyimide

A l'échelle mondiale, il n'existe que 3 sources principales de polyimide, soient DuPont (Kapton), UBE (Upilex) et Mitsui, dont chacune ayant sa propre chimie de fabrication et donc des propriétés relativement différentes.

Par le passé, dans la période des premiers développements sur des cellules solaires sur films plastiques (Ref 12), le Kapton de DuPont avait été écarté pour des raisons de mauvais état de surface. Plus tard, des films provenant de UBE et de Mitsui ont été utilisés en parallèle. Mais le film de Mitsui n'avait, malgré plusieurs essais, jamais donné de résultats satisfaisant en métallisation chez Steiner GmbH, qui était dans cette période l'unique métalliseur pour VHF (les films Mitsui métallisés par Steiner présentaient systématiquement des zones foncées voir noires inexplicables). En outre, le film Upilex de UBE est plus rigide, ce qui facilite son utilisation par rapport au film Mitsui. C'est donc pour ces raisons que finalement, dans la période où apparaissait le problème de délamination, seul le film Upilex de UBE était utilisé chez VHF-Technologies.

Nous avons également essayé un film de qualité Upilex-SGA (traitement siloxane, Tableau 3) dont la métallisation a été réalisée chez Hueck GesmbH, mais aucune amélioration n'a pu être observée.

Une dernière option est disponible chez UBE qui consiste en un traitement plasma réactif. Mais selon la discussion avec UBE, l'effet de ce traitement se réduit rapidement avec le temps, de façon qu'il est à craindre que déjà après le temps de transport depuis le Japon plus aucune amélioration ne pourrait être observée. C'est pour cette raison que cette option n'a pas été retenue dans ce projet.

| | traitement | remarque | résultat VHF |
|---------------|---|---|---|
| Upilex-S | film standard | faces A(air) et B(belt), | substrat de base |
| Upilex-SGA | traitement siloxane sur les deux faces | ce traitement est ciblé pour favoriser l'adhésion des colles acryliques (application PCB) | essai avec métallisation Hueck en dec'02 ; n'a pas donné d'amélioration |
| Mitsui | - | Provoque des traces noires lors de la métallisation | pas poursuivis |
| Kapton HPP-ST | Stabilisé (température) et traitement corona bifacial pour favoriser l'adhésion | Le traitement corona est plutôt ciblé pour favoriser l'adhésion de colles (PCB's) | Très grand dégazage par rapport à UBE (état de surface, porosité ?) et très mauvaise adhésion |

Tableau 3: Résumé des différentes qualités de polyimide testés dans ce projet.

Kapton ST-HPP

Après discussion avec M. Groening, il nous est apparu intéressant de tester l'une ou l'autre source de polyimide, afin de pouvoir évaluer l'influence d'une autre chimie de base sur l'adhésion et les phénomènes de délamination. Des contacts ont donc été pris avec DuPont (Kapton) afin de sélectionner les produits les plus aptes pour notre application. Selon DuPont, un Kapton de type ST-HPP, c.-à-d. stabilisé en température (ST) et traité par corona à haute pression (HPP), devrait être le mieux adapté à notre application.

Ce film a donc été testé en appliquant les meilleures conditions pour l'adhésion obtenues pour le film Upilex, c.-à-d. avec dégazage, traitement anodique Ar, et double métallisation inox-Al (voir chapitre 4.6).

Le résultat de ce test était très décevant, les modules ont subi des très fortes chutes de puissance et d'importants pelages sont apparus après cyclages (Figure 14). Le dégazage propre du film Kapton était très important, ce qui pourrait être lié à la grande porosité déjà observée lors des investigations initiales faites à l'IMT en 1996. Ce film ne serait donc pas du tout adapté pour notre application.

Face à ces résultats, il a été décidé de ne pas poursuivre la filière Kapton.

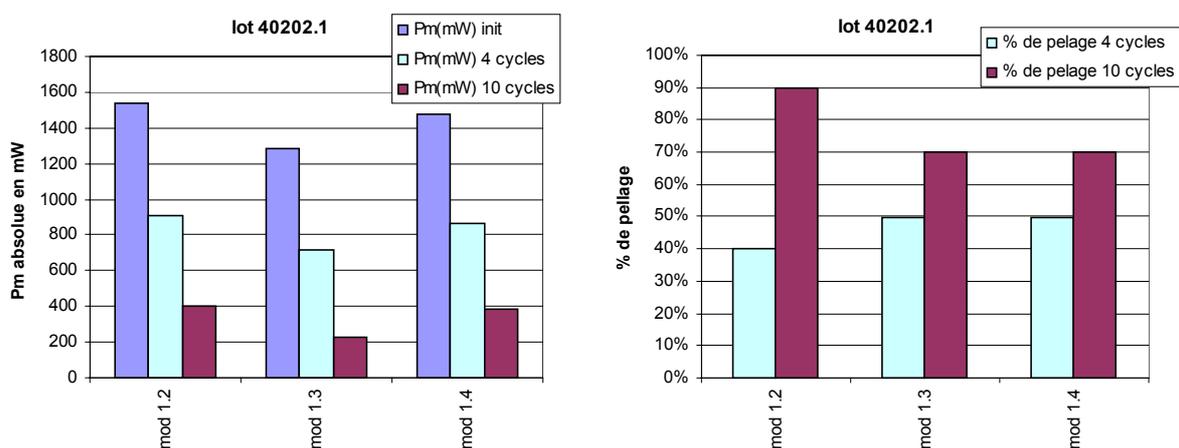


Figure 14: Test du film Kapton ST-HPP (DuPont) sur 3 modules taille A4. Gauche : évolution de la puissance en fonction du nombre de cycles thermiques, droite : évolution des pelages (% des cellules touchées).

Upilex face A :

Vers la fin du projet, et également suite à la recommandation du Dr. Groening, la face A du film standard Upilex-S a été testée en production (normalement, en fonction de l'installation de la bobineuse de VHF, la face B du film était toujours utilisée) :

Deux runs de fabrication ont été effectués sur la face A (40126.1 et 40303.1), avec les conditions d'adhésion optimisées, c.-à-d. avec dégazage, traitement anodique Ar, et double métallisation inox-Al (voir chapitre 4.6).

Dans les deux cas, le résultat était bon pour un petit nombre de cycles, pour devenir très mauvais après 10 et 25 cycles. La Figure 15 donne les résultats pour le run 40303.1. Comme ces résultats ne donnent donc pas d'indication vers une amélioration, cette voie n'a pas été poursuivie.

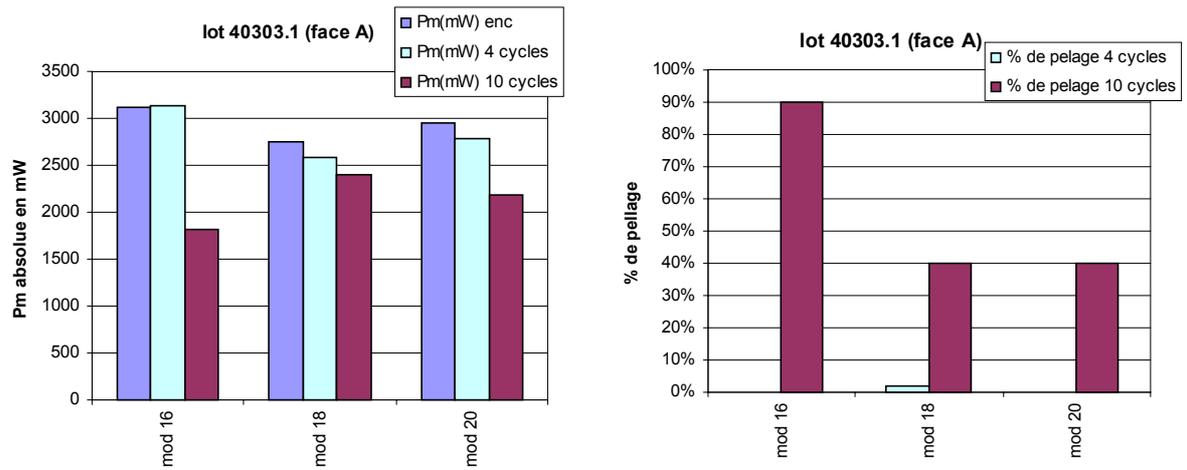


Figure 15: Test de la face A du film Upilex. sur 3 modules taille 30cm x 30cm. Gauche : évolution de la puissance en fonction du nombre de cycles thermiques, droite : évolution des pelages (% des cellules touchées).

4.3 Tâche 1C: Mesure directe de la force d'adhésion

Des métallisations Al sur deux films Upilex métallisés en sous-traitance (Steiner et Hueck), et 3 films métallisés en interne (Upilex face A et B et Kapton HPP-ST) par une procédure optimisée (inox/Al avec traitement Ar anodique) ont été caractérisées par la mesure de la force d'adhésion selon la méthode décrite au chapitre 3.2.

4.3.1 Résultats

Métallisation Steiner (évaporation Al) sur Upilex:

La force mesurée pour cet échantillon est l'une la plus faible de toutes les métallisations; celle-ci est d'environ 0.06 N en moyenne ce qui met en évidence une très mauvaise adhésion de cette métallisation. Ceci correspond bien aux très forts pelages des cellules observés sur cette métallisation (chapitre 4.6).

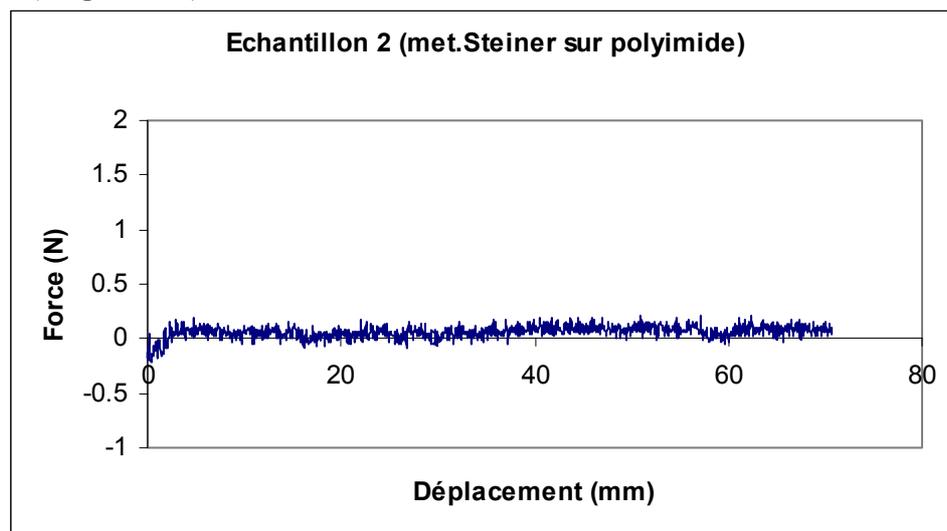


Figure 16: Test de traction pour un film Upilex métallisé en sous-traitance par évaporation (Steiner). Vitesse de traction 50 mm/min.

Métallisation Hueck (évaporation Al avec couche d'accrochage Cr) sur Upilex:

La force de traction mesurée pour deux échantillons de ce type est assez constante; la valeur moyenne se situe à 7.8 N. Dans les deux cas, la couche de métal (aluminium) reste fixée au substrat (polyimide), et la séparation se fait entre la couche adhésive et le métal: la force d'adhésion ne peut donc pas être déterminée, mais elle est supérieure à 8 N.

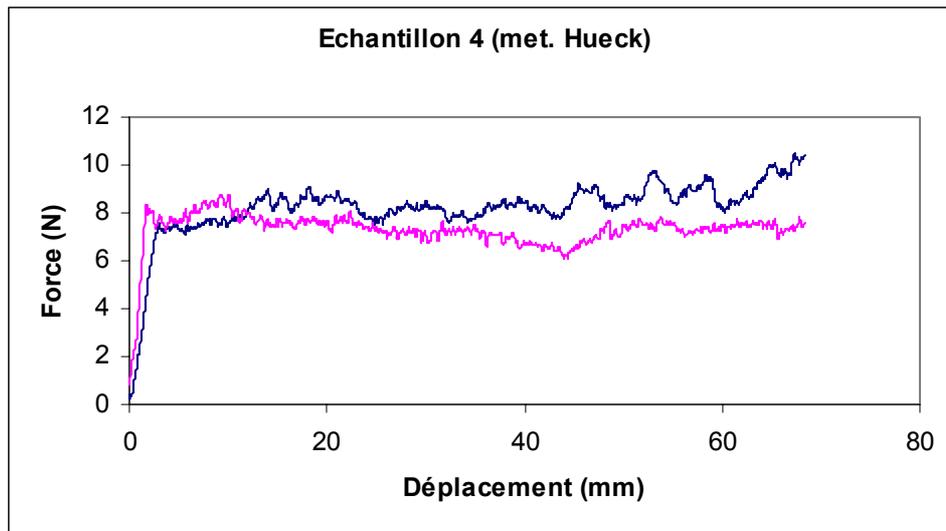


Figure 17: Test de traction sur deux échantillons pour un film Upilex métallisé en sous-traitance par Hueck. Vitesse de traction 50 mm/min. La séparation se fait entre le métal et la bande adhésive.

Métallisation optimisée VHF (traitement anodique Ar et couche inox-Al par sputtering) sur un film Kapton ST-HPP:

Dans ce cas, nous obtenons une force de traction régulière et répétable. Cette force est toutefois basse et nous remarquons un pelage total de la couche métallisée. Cette faible force d'adhésion est donc en bonne corrélation avec la très forte tendance de délamination des cellules solaires sur ce substrat (Figure 14), malgré une métallisation déjà optimisée.

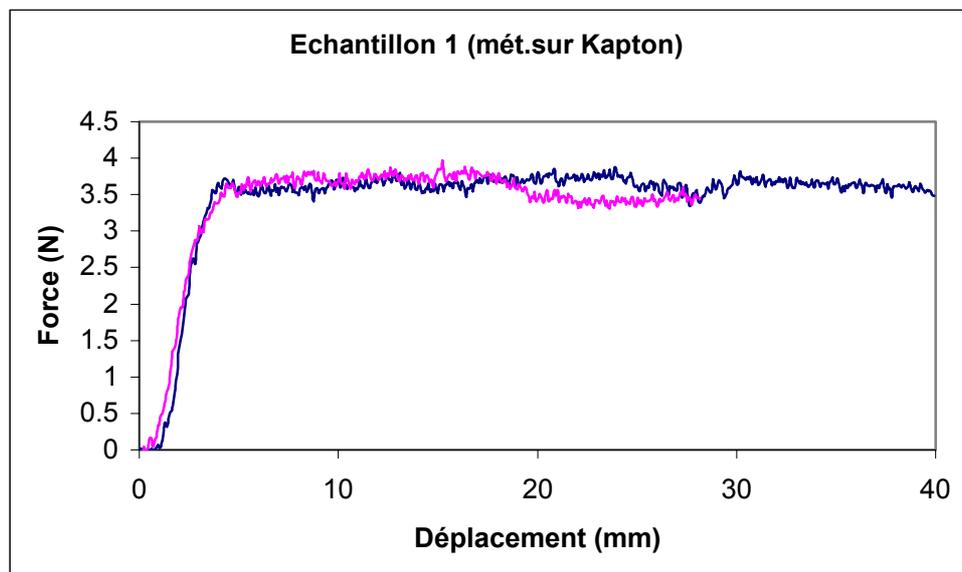


Figure 18: Test de traction sur deux échantillons pour un film Kapton ST-HPP métallisé chez VHF par traitement anodique et sputtering inox-Al. Vitesse de traction 50 mm/min.

Métallisation optimisée VHF (traitement anodique Ar et couche inox-Al par sputtering) sur un film Upilex face B:

La force de traction mesurée est élevée puisque sa moyenne se situe à 14.4 N. Les deux échantillons donnent des valeurs similaires et constantes sur le déplacement. Dans les deux cas, la couche de métal reste fixée sur le substrat. La force d'adhésion du métal est donc supérieure à 14.4N.

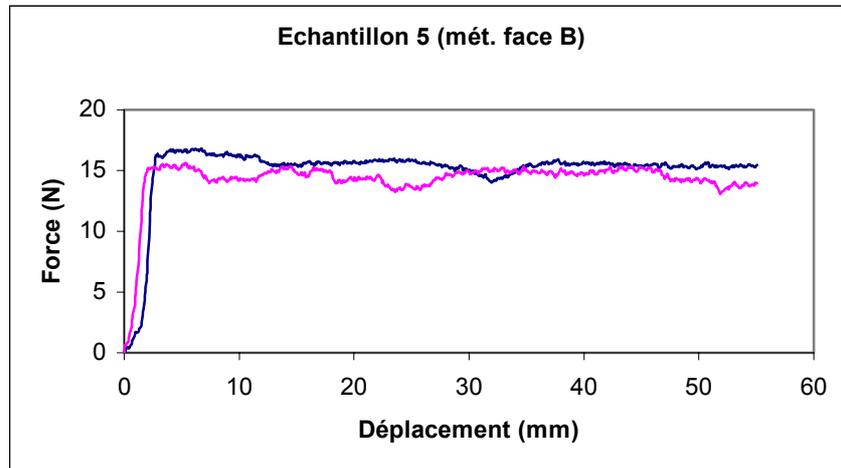


Figure 19: Test de traction sur deux échantillons pour un film Upilex face B métallisé chez VHF par traitement anodique et sputtering inox-Al. Vitesse de traction 50 mm/min.

Métallisation optimisée VHF (traitement anodique Ar et couche inox-Al par sputtering) sur un film Upilex face A:

Cet échantillon présente la force de pelage la plus élevée de tous les échantillons testés puisque celle-ci atteint 17.5 N en moyenne. Dans un cas, la force de pelage est très constante en fonction du déplacement. Les résultats sont assez similaires d'un échantillon à l'autre. Nous remarquons encore une fois que la couche de métal reste solidaire du substrat (polyimide).

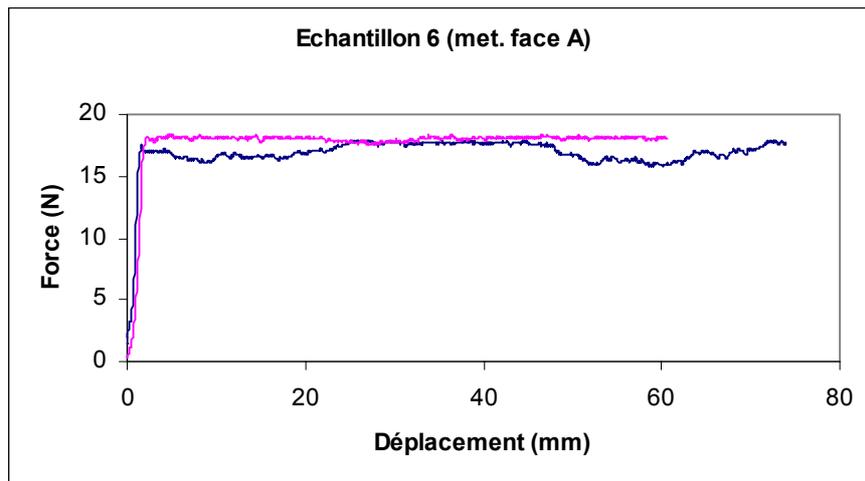


Figure 20: Test de traction sur deux échantillons pour un film Upilex face A métallisé chez VHF par traitement anodique et sputtering inox-Al. Vitesse de traction 50 mm/min.

4.3.2 Conclusion

La Figure 21 donne le résumé des mesures d'adhésion du métal: Dans quelques cas il est possible d'avoir une estimation de la force d'adhésion du métal sur son substrat car celle-ci est inférieure à la force d'adhésion du film adhésif laminé sur l'échantillon. Nous pouvons alors observer la couche de métal se dissociant de son substrat.

Hélas dans bien des cas, le métal ne se sépare pas de son substrat et c'est à l'interface film adhésif-métal que la scission se fait. Ce qui est curieux c'est que des forces très différentes ont été mesurées. Or nous devrions nous attendre à des différences plus faibles puisque le même film adhésif a été utilisé. Il se peut alors que la surface exposée de la couche de métal n'offre pas les mêmes propriétés. Ce que l'on peut dire, c'est que la couche métallique résiste aux valeurs mesurées mais nous n'avons pas une idée précise de la force d'adhésion de cette couche métallique.

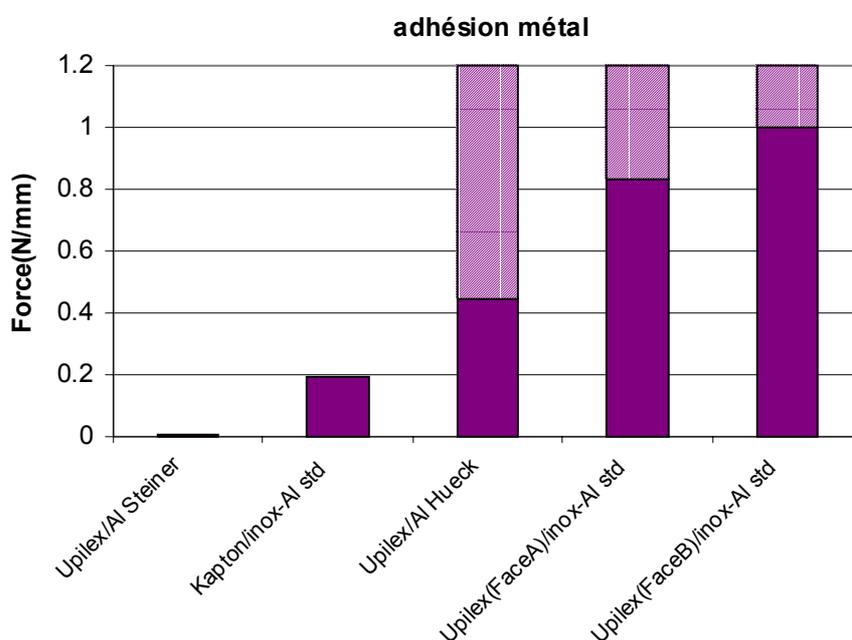


Figure 21: Force d'adhésion par test d'arrachage (la valeur réelle d'adhésion de la métallisation des trois dernières mesures se trouve quelque part dans les parties hachurée du graphe, mais elle est au moins supérieure à la partie pleine).

4.4 Tâche 2: Réduction des défauts induits par la poussière

La fabrication et la structuration du contact arrière métallique chez VHF-Technologies a amené une complication considérable dans le processus de fabrication. La Figure 22 montre la situation initiale, avec la métallisation sous-traitée, et la situation actuelle (intermédiaire), qui a été adoptée dans un premier temps pour produire à l'interne des films métalliques structurés. Cette situation souffre du fait que le plotter de structuration est utilisé à trois reprises, avec comme corollaire une incompatibilité entre les étapes très critiques du point de vue contamination de particules avant le dépôt PECVD du silicium qui se font sur le même plotter que l'étape de mise en série, qui produit des poussières (rayure mécanique) ainsi que des traces causées par les restes de pâtes conductrices.

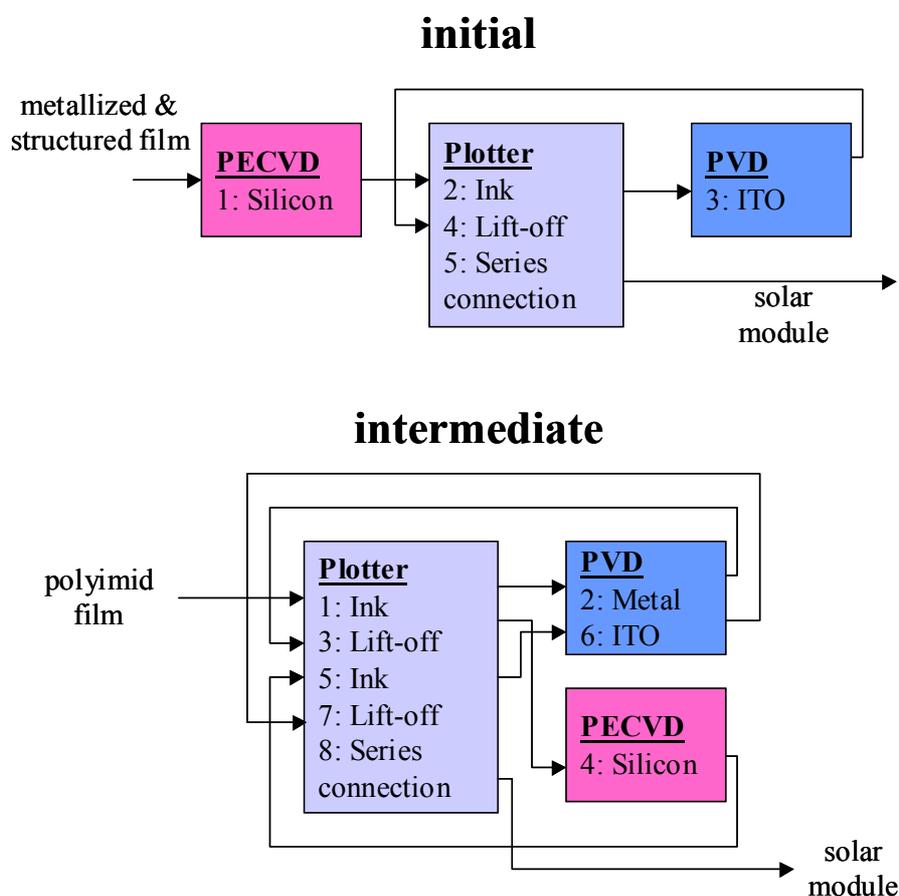


Figure 22: Process flow avec le film plastique métallisé en sous-traitance ("initial"), et situation après introduction de la métallisation à l'interne ("intermediate").

Pour éviter au maximum le croisement des flux de production, il a été prévu d'introduire un deuxième plotter. En combinaison avec l'intégration de l'encrage sur une installation de transfert de film pour la trame de la métallisation, ainsi que l'introduction d'une machine automatique de lift-off, le flux de production a pu être considérablement amélioré (Figure 23). Cette solution a été mise en service dès novembre 2003, avec l'installation de transfert (winder) au Locle, et la machine lift-off avec le second plotter dans les nouveaux locaux de VHF à Yverdon.

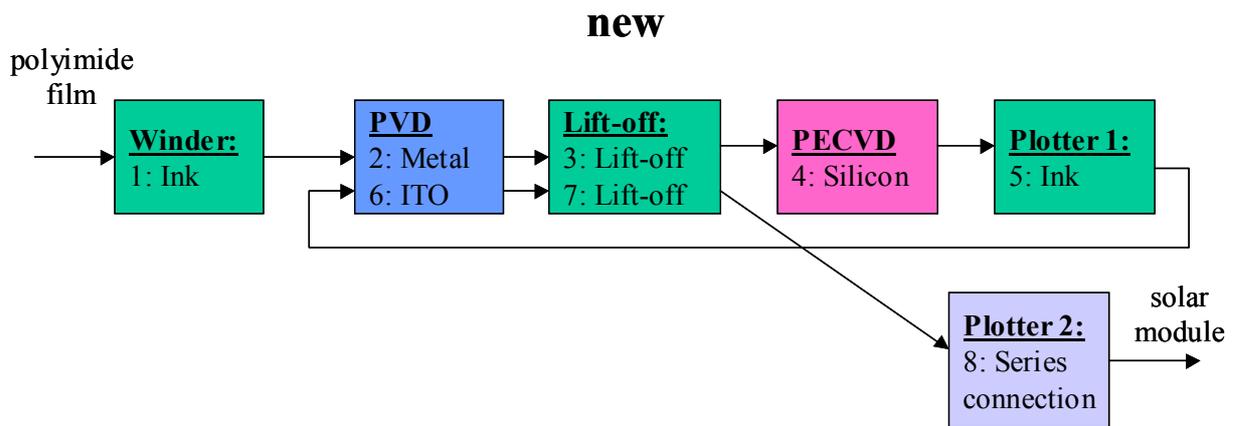


Figure 23: Nouveau process flow réduisant le croisement des flux grâce à l'introduction d'un deuxième plotter, d'une installation de transfert de film permettant le tramage pour la métallisation, et d'une machine lift-off roll-to-roll

4.5 Tâche 3: Structuration du métal

Pour la structuration du métal nous utilisons le procédé communément appelé lift-off. Cette solution est d'ailleurs celle utilisée par Hueck GesmbH, qui donne les meilleurs résultats en termes de courts circuits locaux (par rapport aux résultats obtenus avec les films sous-traités par Steiner qui utilise un masquage mécanique pour la structuration). Notons au passage que la technique lift-off est bien maîtrisée par VHF puisque nous l'utilisons pour la structuration du contact supérieur.

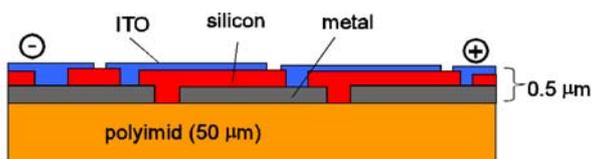


Figure 24: Principe de la mise en série des cellules pour réaliser un module

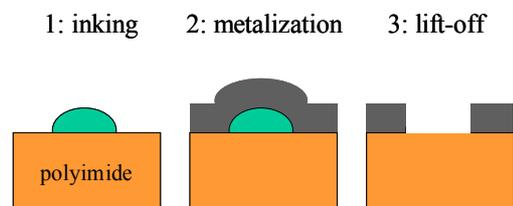


Figure 25: Structuration du métal pour le contact arrière par le processus lift-off

Le procédé lift-off comporte trois étapes, qui sont illustrées schématiquement dans la Figure 25:

La première étape est l'application de l'encre. Les points importants sont tout d'abord de trouver une encre compatible avec les procédés sous vide, d'obtenir les lignes les plus fines possible et sans interruption. Dans le but d'augmenter la capacité et de supprimer un passage sur le plotter, cette étape est maintenant effectuée directement sur l'installation de transfert en traçant à grande vitesse un réseau de lignes parallèles ("winder" dans Figure 23).

La deuxième étape est celle de la métallisation effectuée par pulvérisation cathodique dans l'enceinte décrite dans le chapitre 4.1. Le point délicat réside dans l'éventuel modification de l'encre par les gaz utilisés pour les traitements plasma ou par le sur-échauffement lors du

dégazage. Selon la modification de l'encre, le procédé lift-off pourrait être rendu difficile, voire impossible.

La troisième étape est celle du lift-off de la couche métallique dans les zones tracées. Cette étape consiste à dissoudre l'encre avec de l'acétone libérant ainsi le métal.

Cette étape est très critique, car elle précède directement le dépôt de la couche de silicium. Il est donc important que l'état de surface reste suffisamment propre afin que le dépôt de la couche critique de silicium ait une bonne adhésion, que la réflectivité optique ne soit pas réduite ; de plus, il faut éviter les poussières qui pourraient créer des court-circuits. Il s'agit donc de réduire au maximum la pollution de surface par des résidus d'encre, des débris de métal et des résidus ou traces de solvant. De plus, les forces mécaniques nécessaires pour cette opération de lift-off ne doivent pas abîmer/raayer excessivement la surface du film métallisé.

Dans un premier temps, le lift-off était effectué à la main en utilisant des chiffons de papier imbibés d'acétone. Malgré le côté artisanal de ce procédé fortement dépendant de l'opérateur, de relativement bons résultats en terme de rendement de production ont pu être obtenus dès le début. La figure 14 illustre une distribution serrée de la puissance fournie par une série de 350 modules produits avec cette méthode pour un client, indiquant ainsi une très faible proportion de cellules court-circuitées.

Il faut toutefois mentionner que ce procédé de lift-off manuel est valable pour des applications utilisant une illumination relativement élevée, c'est à dire au delà de 10% du soleil. Aux illuminations plus faibles, la distribution est plus large, indiquant la présence de court-circuits, mais de relativement faible conductance.

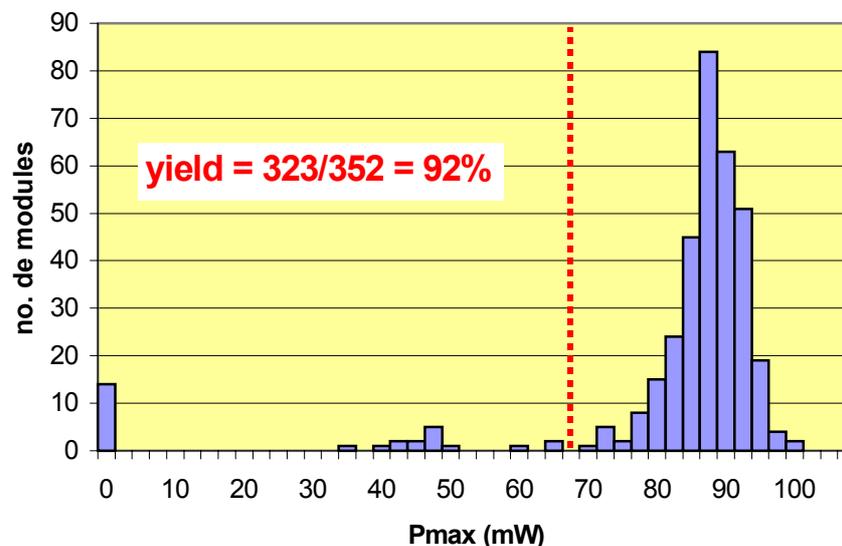


Figure 26: Distribution de la puissance d'un lot de production de 350 modules 8cm x 5cm, fabriqués sur un film métallisé par PVD à l'interne et structuré par lift-off manuel.

Dans un souci pas seulement d'amélioration du rendement de production, mais surtout de sécurité, de capacité de fabrication et de réduction des coûts de production, le processus manuel doit être remplacé par une machine.

La conception de cette machine (Figure 27) est inspirée du processus manuel, avec une brosse rotative et oscillante imbibée d'acétone simulant l'opération effectuée à la main. Après le passage de la brosse, un jet d'acétone propre procède à la finition du nettoyage de la surface.

Lors de ces essais, l'utilisation d'une brosse molle n'a pas donné un résultat acceptable, car le taux de cellules court-circuitées dépassait largement celui obtenu lors du lift-off manuel avec le chiffon de papier. L'analyse au microscope a relevé une bordure du métal présentant un grand nombre de restes de film métallique décollé mais pas enlevé (Figure 28), ce qui explique les courts-circuits.

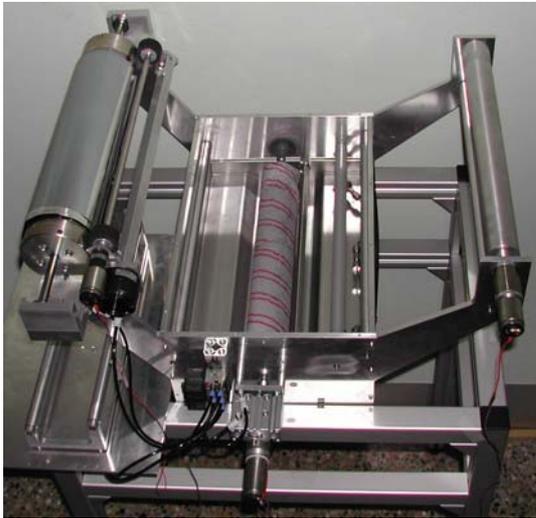


Figure 27: Machine lift-off automatique: à gauche, rouleau du film à traiter; centre: cuve de lavage avec brosse rotative; droite: rouleau récepteur.

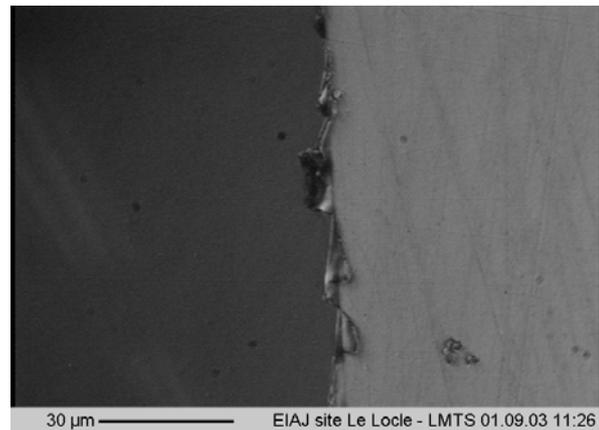


Figure 28: Défauts de lift-off sur les bords de la métallisation (gauche: zone où le métal est enlevé par lift-off, droite: bande métallique restante)

De nouveaux essais, avec des brosses plus dures et d'autres variations de paramètres (vitesses, tension du film, etc.) ont permis d'éliminer ces restes métalliques sur les bords et ainsi réduire les courts-circuits jusqu'à un niveau acceptable. Ainsi, un yield de production même supérieur au lift-off manuel a pu être obtenu (voir Figure 29).

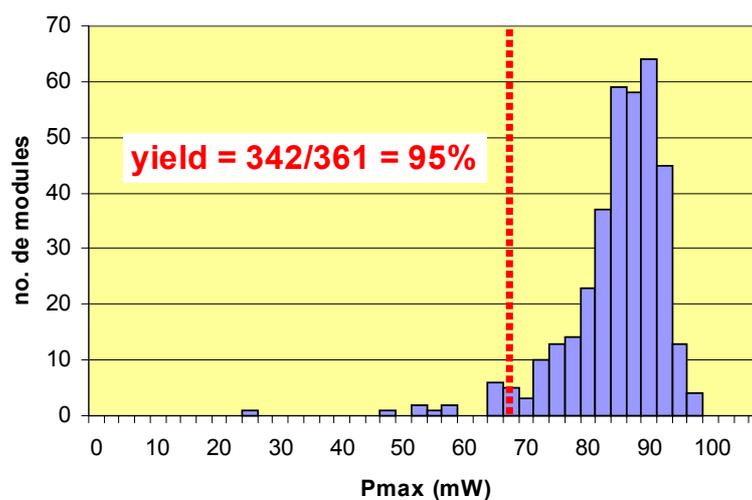
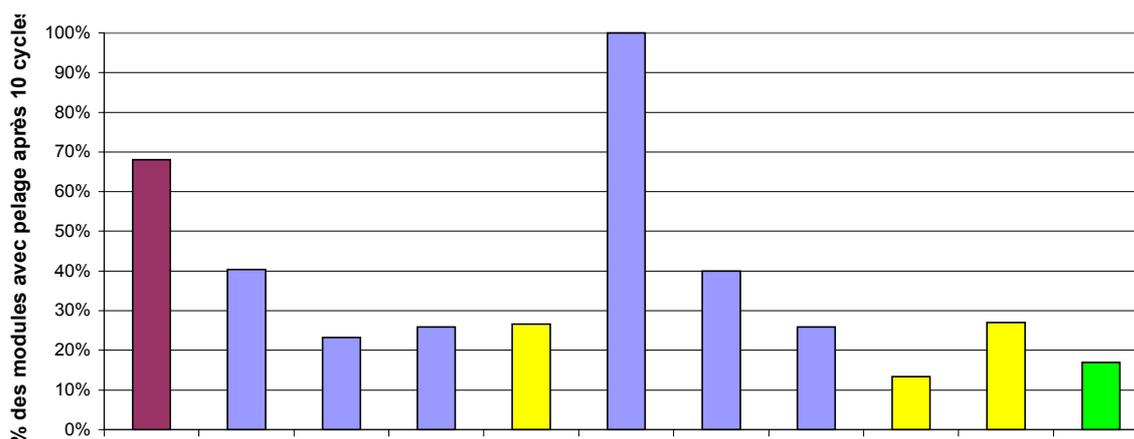


Figure 29: Distribution de la puissance d'un lot de production de 361 modules 8cm x 5cm, fabriqués sur un film métallisé par PVD à l'interne et structuré par la machine de lift-off automatique.

4.6 Tâche 4: Traitements par plasma & couches d'adhésion

Après avoir réalisé les modifications de l'enceinte pour le dépôt des couches métalliques (Tâche 1), et la structuration des films métalliques par lift-off (Tâche 3), les premiers essais de fabrication de modules ont débuté. Selon la littérature et différentes recommandations directes (Ref 1, Ref 2, Ref 3, Ref 7, Ref 10), l'adhésion d'une métallisation d'aluminium sur substrat polyimide est fortement améliorée si on intercale une couche d'accrochage de chrome. Selon M. Groening, il serait même préférable d'utiliser non pas du chrome pure, mais un alliage, comme l'acier inox, afin d'éviter une trop grande affinité entre la couche de métal et le polymère entraînant un affaiblissement de la cohésion du polymère avec le temps.

Par le passé, un premier essai utilisant une couche d'accrochage en acier inox nous avait permis de réduire substantiellement le nombre de délaminations observées après 10 cycles thermiques (Figure 30, "inox-Al") par rapport à un film métallisé en sous-traitance (Figure 30, "Al-sous-traité"). Néanmoins, dans cet essai, les défauts observés avaient l'allure de longues fissures traversant tout un segment d'un module, indiquant éventuellement une adhésion générale encore trop faible qui permet une propagation sur de longues distances suite à une perte d'adhésion initialement locale.



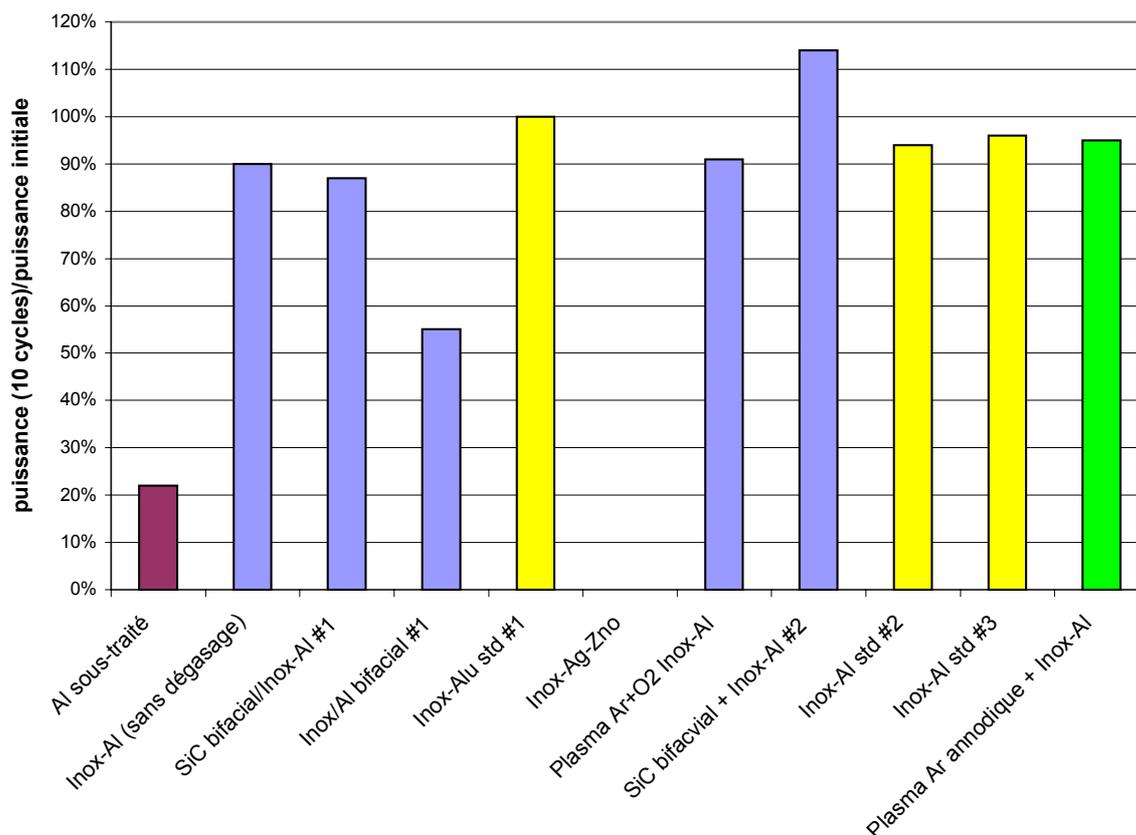


Figure 30: Résultats après 10 cycles thermiques d'une première série de modules tests avec une métallisation par pulvérisation cathodique et différents traitements d'adhésion: Graphe du haut: pourcentage des modules présentant au moins un endroit de délamination. Graphe du bas: Puissance électrique relative après/avant les cyclages thermiques. Les données complètes de toutes ces séries sont données dans l'annexe de ce rapport.

Après ces premiers résultats encourageant, les conditions dans le réacteur PVD ont pu être encore améliorées, notamment par la mise en place en série de la cible inox et de la cible d'aluminium (lors des premiers essais, nous n'avions qu'un seul magnétron, il fallait donc effectuer la couche d'accrochage, mettre à l'air le système, installer la cible aluminium) ainsi que l'installation du système de dégazage par infrarouge. De cette façon, un dégazage complet à 200°C suivis d'une couche d'inox puis de la couche aluminium pouvait s'effectuer en trois passages consécutifs du film sans rupture du vide. Cette nouvelle configuration a considérablement contribué à une réduction du nombre de délaminations ("Inox-Al std #1, #2, #3"). De plus, les défauts ne se présentaient pas sous forme de longues lignes, mais sous forme de petites zones très localisées sans tendance d'extension en surface. Cela peut nous indiquer que l'adhérence est globalement bonne, mais avec des défauts distribués statistiquement de faible adhésion. De tels petits centres de délamination pourraient provenir des pollutions ou inhomogénéités locales du film, des poussières ou des zones défectueuses créées par des arcs pendant le revêtement par pulvérisation cathodique.

L'hypothèse d'une bonne adhésion globale est renforcée par les mesures suivantes : un lot de modules qui n'avaient présenté aucun défaut après 10 cycles ont subi 80 cycles supplémentaires et aucune délamination n'a pu être observée. Notons également que la chute

de la puissance électrique après 90 cycles reste limitée à environ 20% (Figure 31). Néanmoins, cette chute de puissance, qui est probablement liée à la mise en série, devrait idéalement encore être réduite d'avantage.

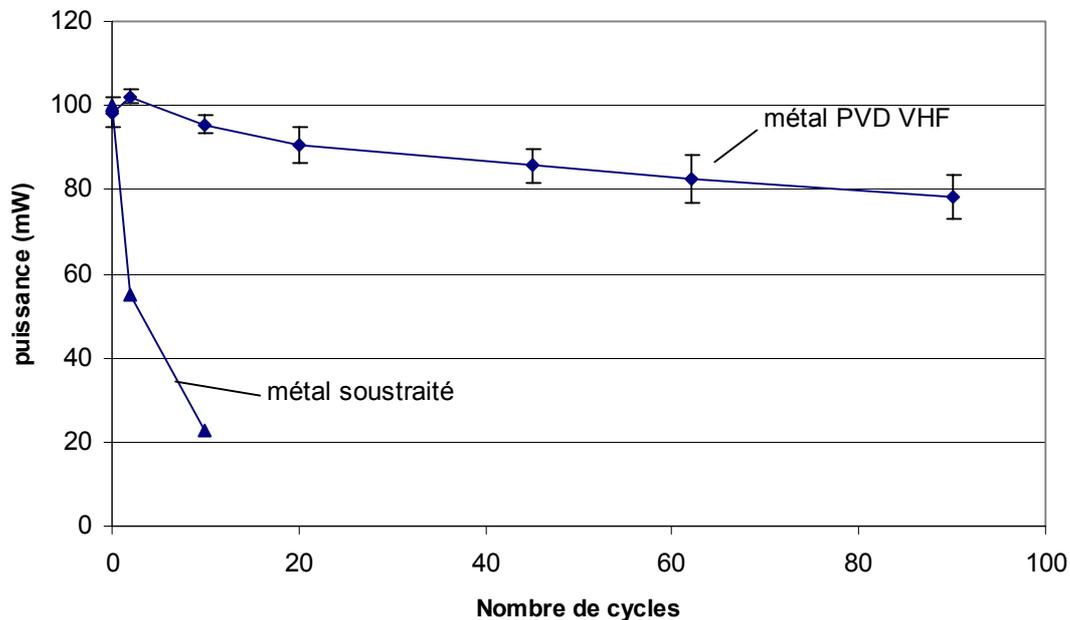


Figure 31: Puissance absolue moyenne d'une série de 10 modules tests, avec métallisation inox-Al standard, en fonction du nombre de cycles thermiques. Sur ces 10 modules, aucune délamination n'a été observée après 90 cycles. En comparaison, les valeurs d'une série de modules sur métal sous-traité sont données.

Dans le but d'améliorer d'avantage l'adhésion, un traitement par plasma argon-oxygène en mode cathodique a été appliqué à l'interface polyimide-métal dans une série supplémentaire (ce type de traitement est souvent mentionné dans la littérature: Ref 2, Ref 3, Ref 4, Ref 7). Mais, en comparaison avec le métal standard inox-Al, un nombre plus élevé de pelages ont été observés.

D'après le Dr. Groening (EMPA), ceci peut être expliqué par un traitement plasma trop fort, qui affaiblit l'adhésion lors du vieillissement par effet de migration des points d'accrochage, ce qui provoque une séparation de phase à la surface du polyimide. Il recommande donc de procéder à un traitement plus court, sans oxygène et en mode anodique, pour éviter un endommagement de la matrice du polyimide par le bombardement ionique (Ref 10).

Un tel traitement a été introduit suite à une nouvelle dérive de l'adhésion avec le traitement inox-Al standard en automne 2003. Ce traitement a donné de bons résultats stables, sans néanmoins complètement éliminer le pelage (Figure 30, plasma Ar anodique). Ce traitement a été retenu comme solution standard pour la reprise de la production en novembre/décembre 2003.

4.7 Tâche 5: Dégazage du substrat polyimide

Un dégazage thermique est systématiquement effectué avant le début du dépôt des couches métalliques (voir Tâche 4, chapitre 4.6). Toutefois, pour des raisons de compatibilité avec

l'encre utilisée pour le lift-off, nous ne pouvons chauffer au-delà de 150°C ; à température plus élevée, cette encre est modifiée devient très difficilement soluble dans l'acétone, ce qui empêche l'étape du lift-off.

4.8 Tâche 6: Barrières de diffusion

Le but de telles barrières est d'empêcher la réabsorption d'eau dans le film polyimide (notamment après le procédé de métallisation et du dépôt de la cellule). Ainsi, une délamination déclenchée par l'effet de l'eau sous l'interface polyimide-métal pourrait être réduite voire supprimée. Une telle structure avec un revêtement bifacial du substrat polyimide est utilisée par un concurrent de VHF-Technologies (Ref 3) ainsi que dans la fabrication de transistors TFT sur film polyimide (Ref 5, Ref 6).

Nous avons testé deux types de barrières : l'une métallique et l'autre à base de silicium carbide. Le silicium carbide a en principe deux avantages par rapport au métal: comme il est déposé par PE-CVD, la couche est plus étanche par rapport au cas du métal déposé par pulvérisation cathodique. D'autre part, toutes les observations des phénomènes de délamination ont systématiquement montré que dans les zones où le silicium est directement déposé sur le polyimide, sans métal interposé, aucun pelage n'est observé. Ceci semble indiquer que l'adhésion polyimide-silicium serait supérieure à l'adhésion polyimide-métal. Un revêtement bifacial de silicium avant le dépôt de la métallisation pourrait donc éventuellement aussi aider dans ce sens, indépendamment de sa fonction de barrière.

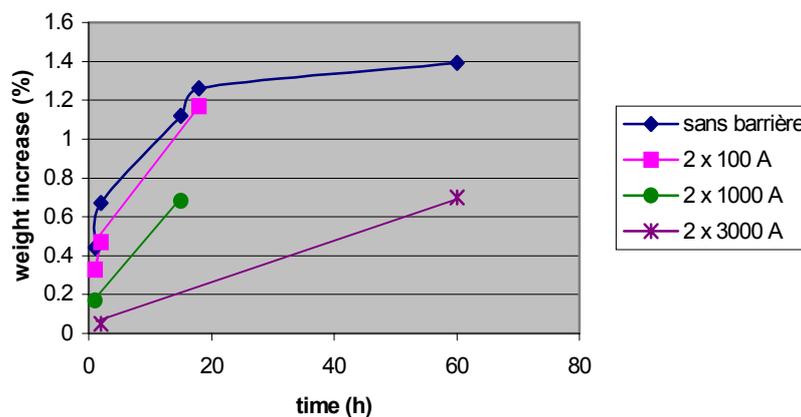


Figure 32: Augmentation du poids en fonction du temps d'échantillons de polyimide avec différentes épaisseurs de couches barrières bifaciales en silicium carbide. Conditions d'exposition: 100% RH.

L'efficacité des barrières en silicium-carbide a été évaluée par des essais de ré-absorption d'eau. Il en découle que 1000Å de silicium carbide sont nécessaires pour sensiblement retarder la ré-absorption de l'eau. Des essais avec des couches SiC de 3000Å ont montré que la ré-absorption n'est que retardée, par un facteur de environ 20-50, mais en aucun cas complètement éliminée. Il nous semble donc utopique de tenter de trouver une barrière absolue, et que l'approche de l'amélioration de l'adhérence comme point numéro un reste la ligne directrice de ce projet.

Deux séries de modules test ont été effectués, en utilisant une épaisseur de SiC de 3000 Å sur les deux côtés du film. Les résultats concernant la délamination sont pour 10 cycles similaires

à ceux obtenus avec une simple métallisation Inox-Alu standard (voir Figure 30, "SiC-bifacial"#1 et #2).

L'investigation sur plus de cycles a néanmoins montré une meilleure stabilité de la puissance électrique des modules sur le substrat encapsulé avec du SiC bifacial : la Figure 33 montre l'évolution de la puissance d'un groupe de 9 modules sur 90 cycles thermique. On remarque une stabilité quasi-totale de la puissance à partir de 20 cycles, tandis que dans le cas de la métallisation inox-Al standard, une lente mais continue dégradation est observée. Dans les deux cas aucune délamination n'est observée, et la réduction de la puissance étant du type augmentation de la résistance série serait attribuée à un vieillissement de la mise en série des modules. Ce vieillissement serait supprimé par la présence de la couche Si, qui stabiliserait et limiterait les expansions thermiques du substrat et éviterait ainsi le vieillissement de la connexion en série.

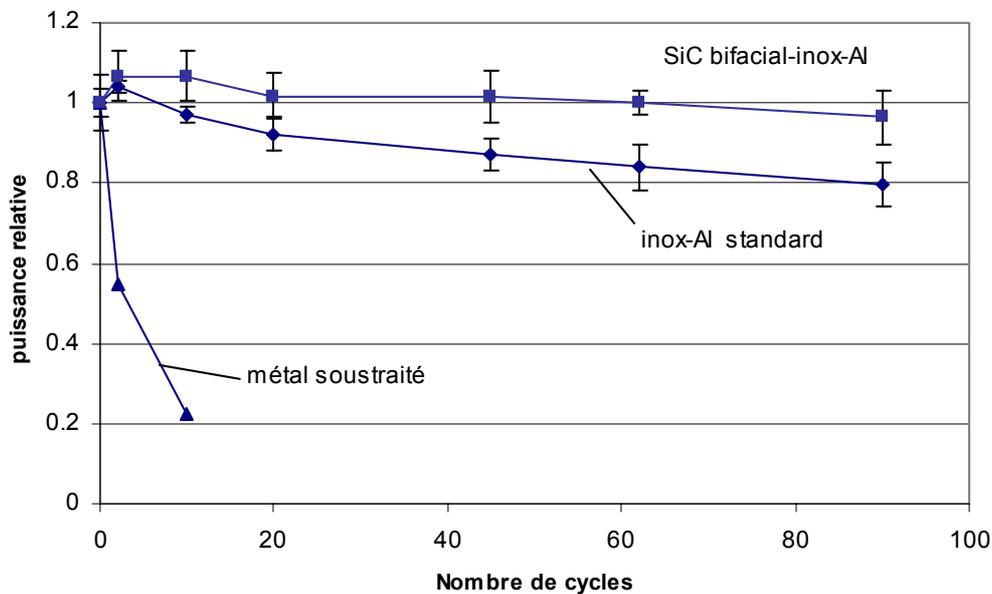


Figure 33: Evolution de la puissance relative d'un groupe de 9 modules sur substrat polyimide encapsulé par une couche SiC sur 90 cycles thermiques, en comparaison avec les données des modules sur substrat sans encapsulation SiC (Figure 31).

Un autre essai a été réalisé avec une couche inox-Al sur chaque côté du film. Dans ce cas, le nombre de pelages reste inchangé par rapport à une simple métallisation sur une face (voir Figure 30, série "inox-Al bifacial").

4.9 Tâche 7: réduction du stress par l'adaptation des contacts métal et TCO

Différents essais ont été effectués en remplaçant la couche d'aluminium par une double couche Ag/ZnO. Ce type de contact est souvent mentionné dans la littérature pour donner une meilleure réflexion par rapport à une simple couche Al. Dans le contexte de la problématique de la délamination, les différences appréciables des coefficients thermiques et des modules élastiques entre Al et Ag/ZnO ont donné un certain espoir de pouvoir réduire le stress entre les couches par l'introduction de la double couche ZnO/Ag.

Cependant, les essais se sont heurtés à un problème de court-circuits généralisé. Malgré l'application de différents paramètres de dépôt et de différentes épaisseurs de couches Ag et ZnO, aucune cellule sans courant de fuite très élevé n'a pu être réalisée.

Une série de modules tests non-fonctionnels déposés sur un substrat Ag/ZnO a tout de même été produite et mise en cycle thermique. Dans ce cas, une délamination systématique a été observée entre la couche Ag et le silicium (voir Figure 30). Ceci indiquerait un problème supplémentaire d'adhésion entre Ag et ZnO voir entre ZnO et silicium. En vue de ces nombreux problèmes, les essais avec Ag/ZnO ont donc été abandonnés pour l'instant.

4.10 Tâche 8

L'application de couches anti-stress n'a pas été réalisée sur recommandation de l'expert.

4.11 Tâche 9

Cette tâche a été réalisée en collaboration avec des partenaires industriels tiers. Les tests avec d'autres films de fluoropolymère transparents ont donné des premiers résultats encourageants, laissant espérer que des couches barrières sophistiquées (SiO_x) ne seront pas nécessaires pour garantir la longévité d'une cellule amorphe sur substrat plastique.

Ceci représenterait un atout clé pour la technologie amorphe flexible par rapport aux technologies concurrentes (CIGS, dye-sensitized) connues pour être très sensibles à l'humidité.

5 Conclusions du projet

Comme résultat principal de ce projet, la métallisation par pulvérisation d'une couche aluminium après un traitement plasma anodique et une couche d'accrochage en inox donne une grande amélioration de la fiabilité par rapport à l'état initial (couches Al par évaporation chez un sous-traitant).

Typiquement moins de 20% des modules montrent une fissure après 10 cycles thermiques de -40°C à +85°C, et la puissance électrique dégrade moins de 10%.

Le tableau ci-dessous donne le détail des buts dans chaque secteur (tâches), les résultats obtenus, et une évaluation du degré d'atteinte des ces buts. :

| Tâches | Buts | Résultats obtenus | Degrés de réalisation |
|--------|---|---|-----------------------|
| 1 A | Infrastructure pour la métallisation par PVD | - le système PVD a été équipé pour la métallisation par deux magnétrons (Al et inox), un fours de dégazage, et une électrode linéaire pour le traitement plasma. | - 100% |
| 1 B | Tester différents types de polyimide | - un film Upilex-SGA a été testé par Hueck, sans donner une meilleure adhésion - des films Mitsui n'ont pas donné des qualités de métallisation satisfaisantes - un essai sur un film Kapton ST-HPP (DuPont) a donné une très mauvaise adhésion. - la face A du film Upilex a été testée, sans donner une amélioration par rapport à la face B | - 100% |
| 1C | Mesure directe de la force d'adhésion du métal sur le polyimide | - une méthode de pelage avec des feuilles PET autoadhésives à été mise au point - des cas de très faible adhésion du métal ont bien pu être mesurés : la méthode est donc très utile pour un première sélection - pour les cas de forte adhésion, la méthode n'est plus utilisable à cause de la trop faible force d'adhésion du PET sur la couche métallique | - 100% |
| 2 | Réduction des défauts introduits par la poussière | - le concept d'un nouveau flux de fabrication a été déterminé. - les 3 nouveaux équipements pour réaliser ce flux (bobineuse avec tramage, machine lift-off, et nouveau | - 100% |

| | | | |
|---|--|--|--|
| | | <p>plotter pour la mise en série) sont opérationnels.</p> <ul style="list-style-type: none"> - mise en opération du nouveau flux de production entre Le Locle et le nouveau site à Yverdon ; démarrage de la production. | |
| 3 | Structuration de la couche métallique par lift-off | <ul style="list-style-type: none"> - lift-off manuel des couches métalliques déposées par PVD donne des bons yields de production pour des applications à forte illumination. - installation et optimisation du lift-off par la nouvelle machine roll-to-roll. - un yield de production de 95% est atteint sur un substrat structuré par lift-off automatique. | <ul style="list-style-type: none"> - un bon yield est atteint pour des applications extérieurs (marché actuel principal de VHF) - pour des applications intérieurs (basse intensités), des améliorations supplémentaires seront nécessaires. |
| 4 | Traitements d'adhésion | <ul style="list-style-type: none"> - un dégazage à 200°C du polyimide suivis d'une double couche inox-Al donne un taux de pelage entre 10 et 20% après 10 cycles thermiques - les pelages restants sont de très petite taille, et sans extension avec le temps - un traitement par plasma Ar-O₂ cathodique ne donne pas une amélioration supplémentaire - dans la dernière phase du projet, un dégazage optimisé en combinaison avec un traitement plasma anodique a permis une meilleure stabilité des résultats | - 100% |
| 5 | Dégazage du polyimide | <ul style="list-style-type: none"> - un dégazage à 200°C a été intégré dans le processus de métallisation (voir tâche 4) - des températures plus élevées ne sont pas compatibles avec le processus de lift-off | - 100% |
| 6 | Encapsulation du polyimide | <ul style="list-style-type: none"> - une encapsulation bifaciale par 2 fois 3000 Å de SiC par PE-CVD retarde la reprise d'eau d'un facteur 20-50 par rapport à un polyimide non-traité - des séries de modules sur polyimide sur film encapsulé SiC ne donnent pas une amélioration significative par rapport aux meilleurs résultats développés dans la tâche 4 | - 100% |
| 7 | Changement de | - une série de tests en utilisant un | - abandonnée en vue des |

| | | | |
|---|---|--|--|
| | la structure de la cellule pour réduire le stress | contact arrière inox-Ag-ZnO résulte dans un court-circuit complet de toutes les cellules - un test de cyclage sur des modules non-fonctionnels montre une délamination entre le métal et la cellule | difficultés techniques supplémentaires introduites par l'utilisation de l'argent |
| 8 | couches anti-stress | | - abandonnée en accord avec l'expert du projet |
| 9 | changement de l'encapsulation | - 3 nouveaux types de films fluoropolymers transparents ont été testés avec succès | - 100% |

6 Références

- Ref 1: Polyimides: Fundamentals and applications, Marcel Dekker Inc, 1996, pp.629*
- Ref 2: Metallized plastics, Marcel Dekker Inc, 1996, pp.227*
- Ref 3: ITFT, EU patent application EP 385 007, brevet abandonné*
- Ref 4: DuPont Technical Bulletin "Adhesion to Kapton"*
- Ref 5: Choi et al, MRS Symp Vol 629, FF5.10.1, 2000*
- Ref 6: A. Sazonov et al, J.Vac.Sci.Technol. A 18(2), 2000, pp780*
- Ref 7: Dr. Bergmann, Hueck Folien GesmbH, communication privée*
- Ref 8: J. Kumura, UBE Deutschland, communication privée*
- Ref 9: Requête du projet de mars '03*
- Ref 10: Procès verbal de la séance avec M. Groening du 30.7.03*
- Ref 11: Norme CEI 61646*
- Ref 12: R. Felder, travail de diplôme, IMT Uni Neuchâtel, 1996*

7 Annexe: Données des tests de cyclage thermique

| | | | |
|---|-------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Série 1 (Duval 101) | | | |
| Métal: Al métallisé par Hueck GmbH (évaporation) | | | |
| Remarques: | | | |
| Pelages: | | | |
| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
| 50 | 34 | 49 | |
| | 68% | 12.2% | micro-peignes |
| Performance: | | | |
| Puissance moyenne initiale | | Puissance relative après 10 cycles | |
| 44.7 mW | | 22% | |
| <p>Lot 00101 Duval</p> | | | |

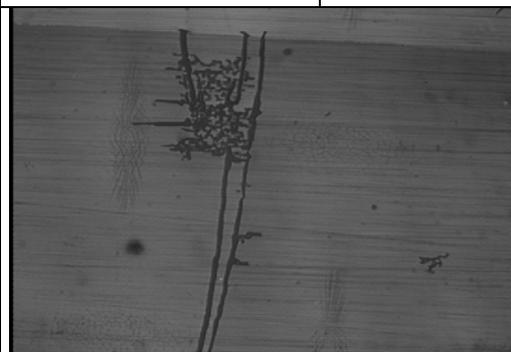
Série 2 (Duval 104)

Métal: **PI/inox/Al sans dégazage**

Remarques:

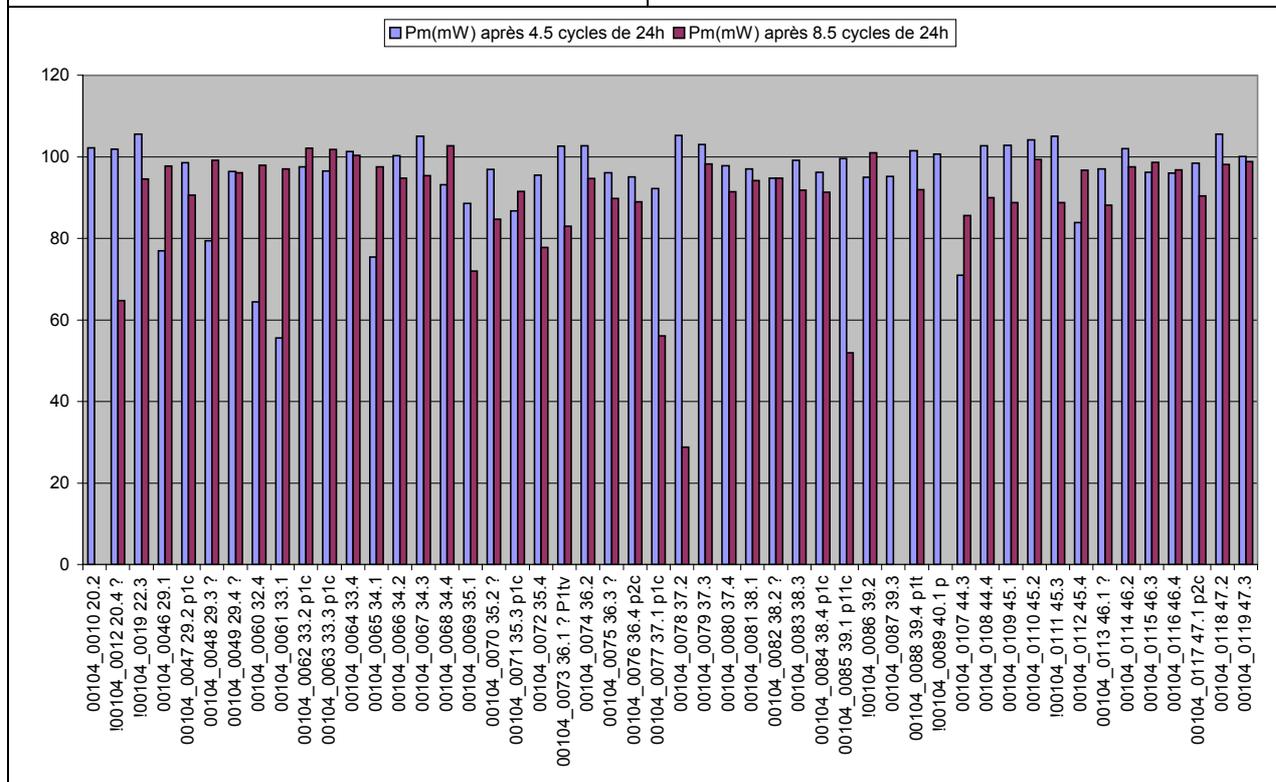
Pelages:

| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
|-------------|-------------------------|--------------------------|------------------|
| 47 | 14 | 26 | |
| | 29% | 7% | fissures |



Performance:

| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
|----------------------------|------------------------------------|
| 84.3 mW | 90% |



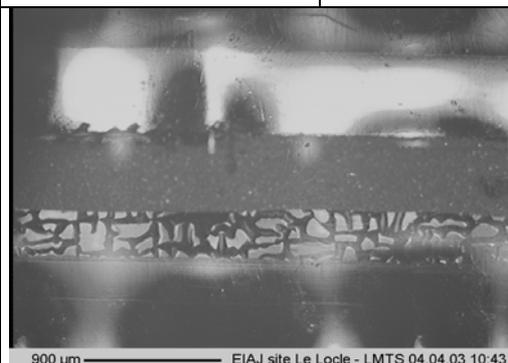
Série 3

Métal: **SiC/PI/SiC/inox/Al**

Remarques:

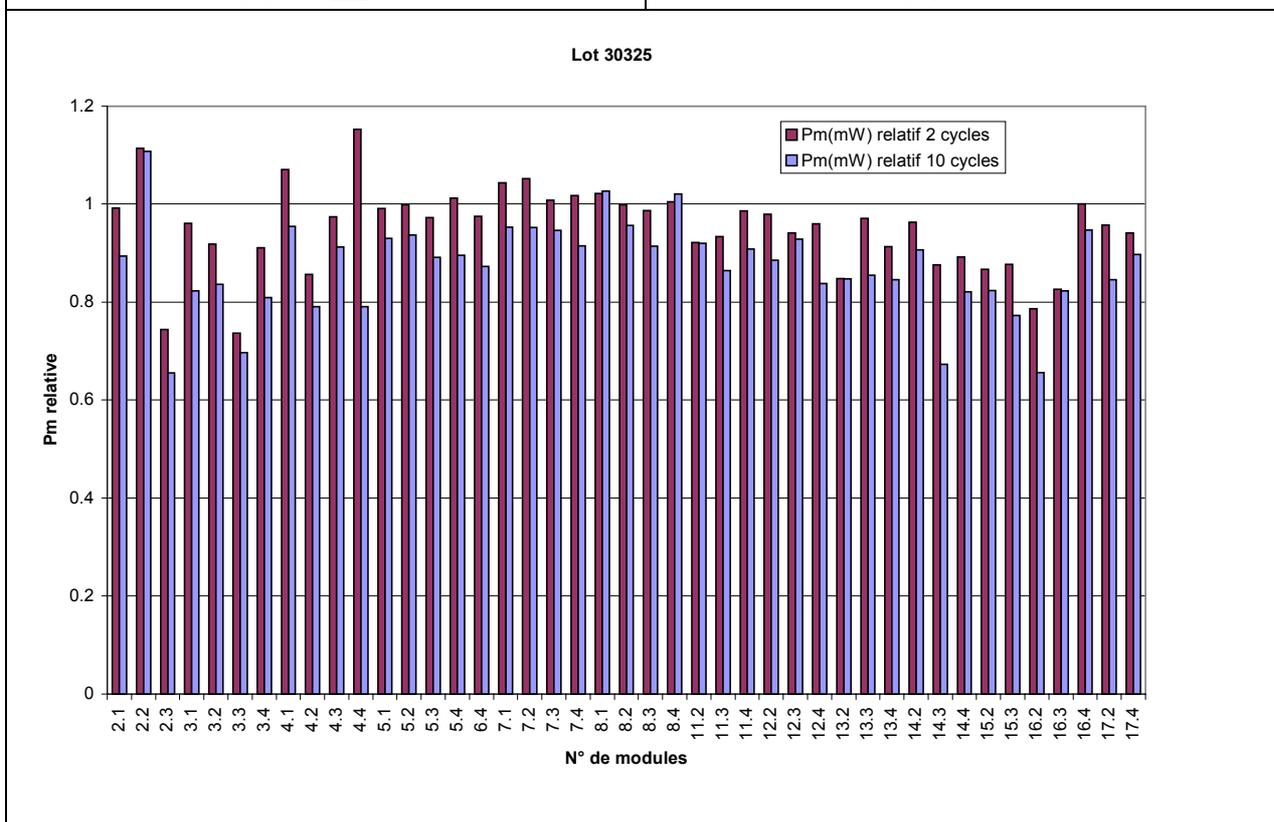
Pelages:

| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
|-------------|-------------------------|--------------------------|-------------------|
| 43 | 10 | 11 | |
| | 23% | 3.2% | intermétal |



Performance:

| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
|----------------------------|------------------------------------|
| 66.7 mW | 87.3% |



Série 4

Métal: **Al/inox/PI/inox/Al**

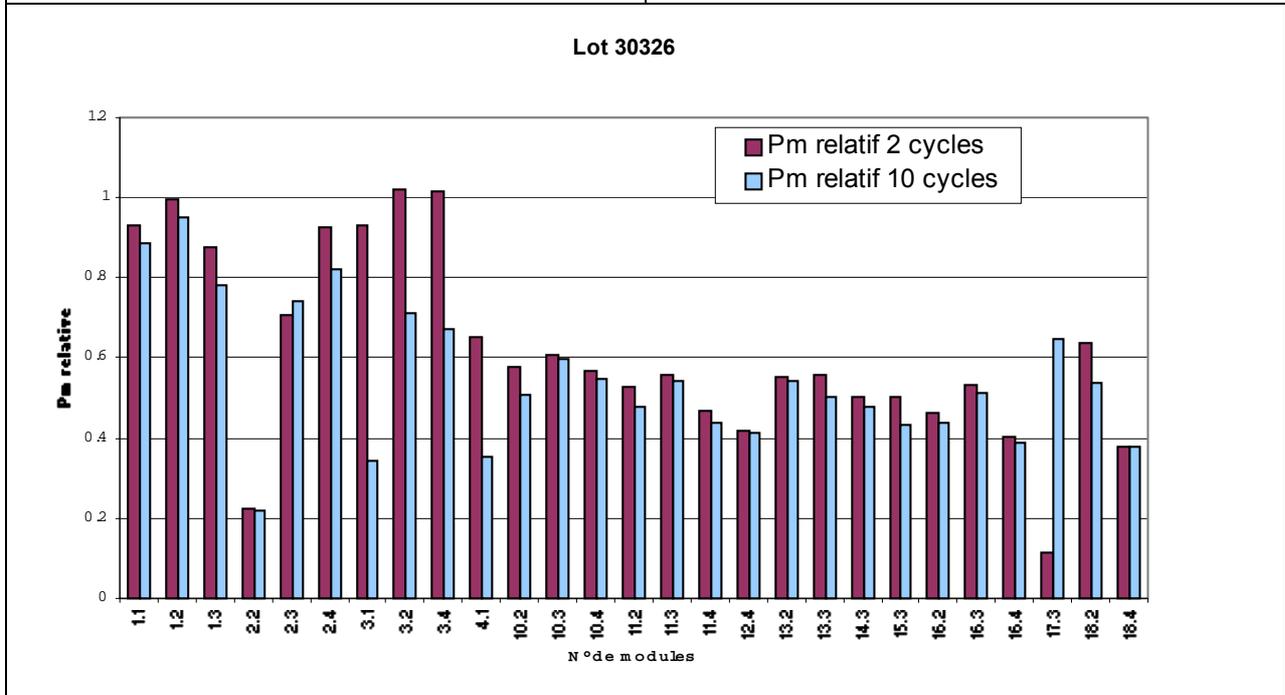
Remarques:

Pelages:

| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
|-------------|-------------------------|--------------------------|------------------|
| 27 | 7 | 10 | |
| | 26% | 4.6% | fissures |

Performance:

| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
|----------------------------|------------------------------------|
| 48.5 mW | 55% |

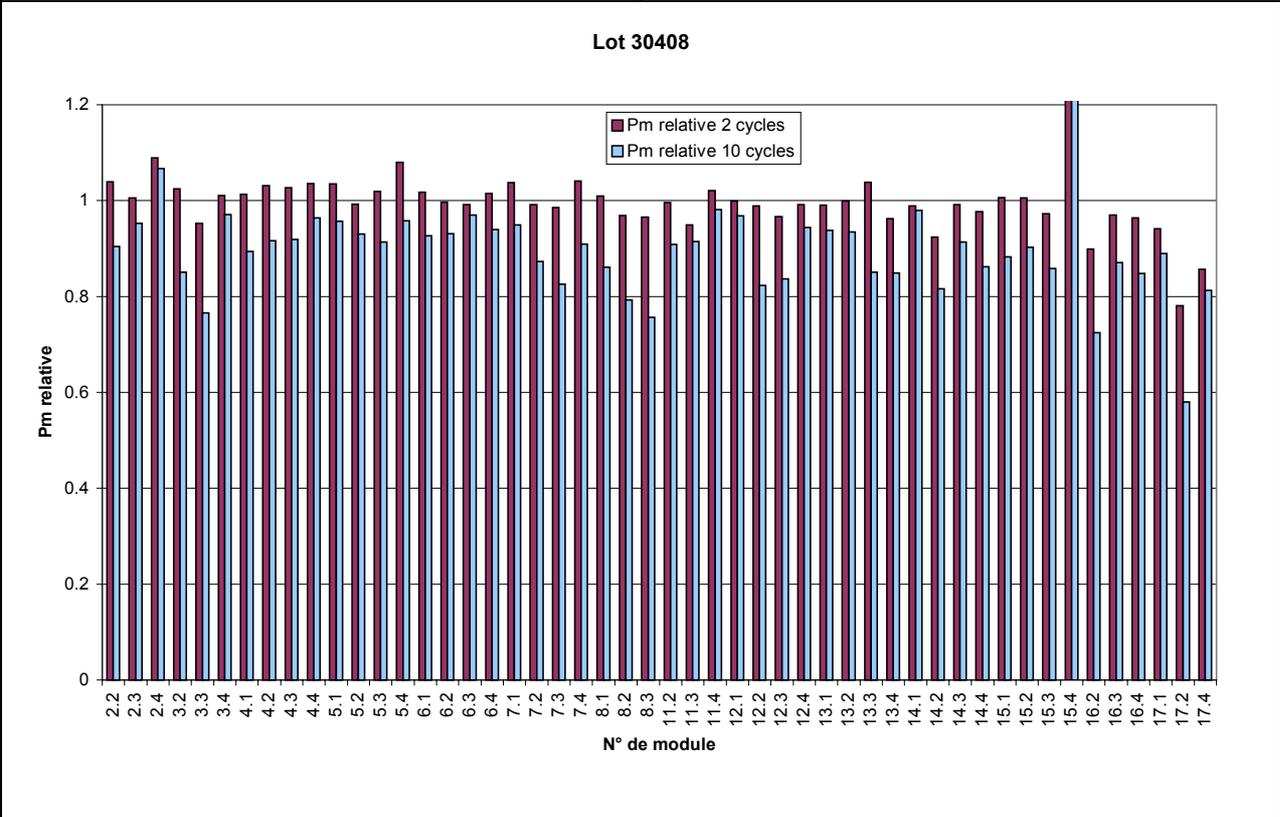


| <h2>Série 5</h2> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------|------------------------------------|------------------|---------------|---------------------|----------------------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Métal: PI/inox/Al | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remarques: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pelages: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 8 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 27% | 4.1% | étoiles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Performance: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Puissance moyenne initiale | | Puissance relative après 10 cycles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 76.5 mW | | 100% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Lot 30327</p> <table border="1" style="display: none;"> <caption>Relative Power Data for Lot 30327</caption> <thead> <tr> <th>N° de modules</th> <th>Pm relatif 2 cycles</th> <th>Pm relatif 10 cycles</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2.3</td><td>1.00</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>2.4</td><td>1.01</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>3.1</td><td>1.04</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>3.3</td><td>1.00</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>4.1</td><td>1.01</td><td>0.90</td></tr> <tr><td>4.2</td><td>1.03</td><td>1.02</td></tr> <tr><td>5.3</td><td>0.99</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>5.4</td><td>0.99</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>6.1</td><td>1.01</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>6.4</td><td>1.00</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>7.1</td><td>1.03</td><td>1.02</td></tr> <tr><td>7.3</td><td>0.99</td><td>1.04</td></tr> <tr><td>8.2</td><td>1.02</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>8.3</td><td>1.01</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>11.2</td><td>1.04</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>11.4</td><td>0.98</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>12.2</td><td>1.14</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>12.3</td><td>0.97</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>13.1</td><td>1.01</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>13.2</td><td>1.01</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>13.3</td><td>1.01</td><td>1.03</td></tr> <tr><td>13.4</td><td>1.02</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>14.1</td><td>1.01</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>14.3</td><td>0.99</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>15.2</td><td>0.98</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>15.3</td><td>1.04</td><td>1.03</td></tr> <tr><td>16.1</td><td>1.01</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>16.2</td><td>0.97</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>17.3</td><td>0.97</td><td>0.97</td></tr> <tr><td>17.4</td><td>0.99</td><td>0.93</td></tr> </tbody> </table> | | | | N° de modules | Pm relatif 2 cycles | Pm relatif 10 cycles | 2.3 | 1.00 | 0.97 | 2.4 | 1.01 | 0.96 | 3.1 | 1.04 | 0.99 | 3.3 | 1.00 | 0.96 | 4.1 | 1.01 | 0.90 | 4.2 | 1.03 | 1.02 | 5.3 | 0.99 | 1.00 | 5.4 | 0.99 | 0.97 | 6.1 | 1.01 | 0.98 | 6.4 | 1.00 | 1.05 | 7.1 | 1.03 | 1.02 | 7.3 | 0.99 | 1.04 | 8.2 | 1.02 | 0.99 | 8.3 | 1.01 | 1.01 | 11.2 | 1.04 | 1.05 | 11.4 | 0.98 | 1.01 | 12.2 | 1.14 | 1.10 | 12.3 | 0.97 | 0.97 | 13.1 | 1.01 | 1.01 | 13.2 | 1.01 | 1.01 | 13.3 | 1.01 | 1.03 | 13.4 | 1.02 | 0.96 | 14.1 | 1.01 | 1.00 | 14.3 | 0.99 | 0.98 | 15.2 | 0.98 | 0.98 | 15.3 | 1.04 | 1.03 | 16.1 | 1.01 | 1.01 | 16.2 | 0.97 | 0.99 | 17.3 | 0.97 | 0.97 | 17.4 | 0.99 | 0.93 |
| N° de modules | Pm relatif 2 cycles | Pm relatif 10 cycles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.3 | 1.00 | 0.97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.4 | 1.01 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 | 1.04 | 0.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.3 | 1.00 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 | 1.01 | 0.90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.2 | 1.03 | 1.02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.3 | 0.99 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.4 | 0.99 | 0.97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.1 | 1.01 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.4 | 1.00 | 1.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.1 | 1.03 | 1.02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.3 | 0.99 | 1.04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.2 | 1.02 | 0.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.3 | 1.01 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11.2 | 1.04 | 1.05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11.4 | 0.98 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.2 | 1.14 | 1.10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.3 | 0.97 | 0.97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.1 | 1.01 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.2 | 1.01 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.3 | 1.01 | 1.03 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.4 | 1.02 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14.1 | 1.01 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14.3 | 0.99 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15.2 | 0.98 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15.3 | 1.04 | 1.03 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16.1 | 1.01 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16.2 | 0.97 | 0.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.3 | 0.97 | 0.97 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.4 | 0.99 | 0.93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|
| Série 6 | | | |
| Métal: PI/inox/Ag/ZnO | | | |
| Remarques: | | | |
| Pelages: | | | |
| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
| 10 | 10 | 23 | |
| | 100% | 27% | étoiles |
| | | | |
| Performance: | | | |
| Puissance moyenne initiale | | Puissance relative après 10 cycles | |
| pas mesurable | | | |

| | | | |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| <h1>Série 7</h1> | | | |
| Métal: PI/plasma Ar-O₂/inox/Al | | | |
| Remarques: | | | |
| Pelages: | | | |
| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
| 50 | 20 | 29 | |
| | 40% | 7.2% | étoiles/fissures |

| | |
|----------------------------|------------------------------------|
| Performance: | |
| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
| 77 mW | 91% |



Série 8

Métal: **SiC/PI/SiC/inox/Al**

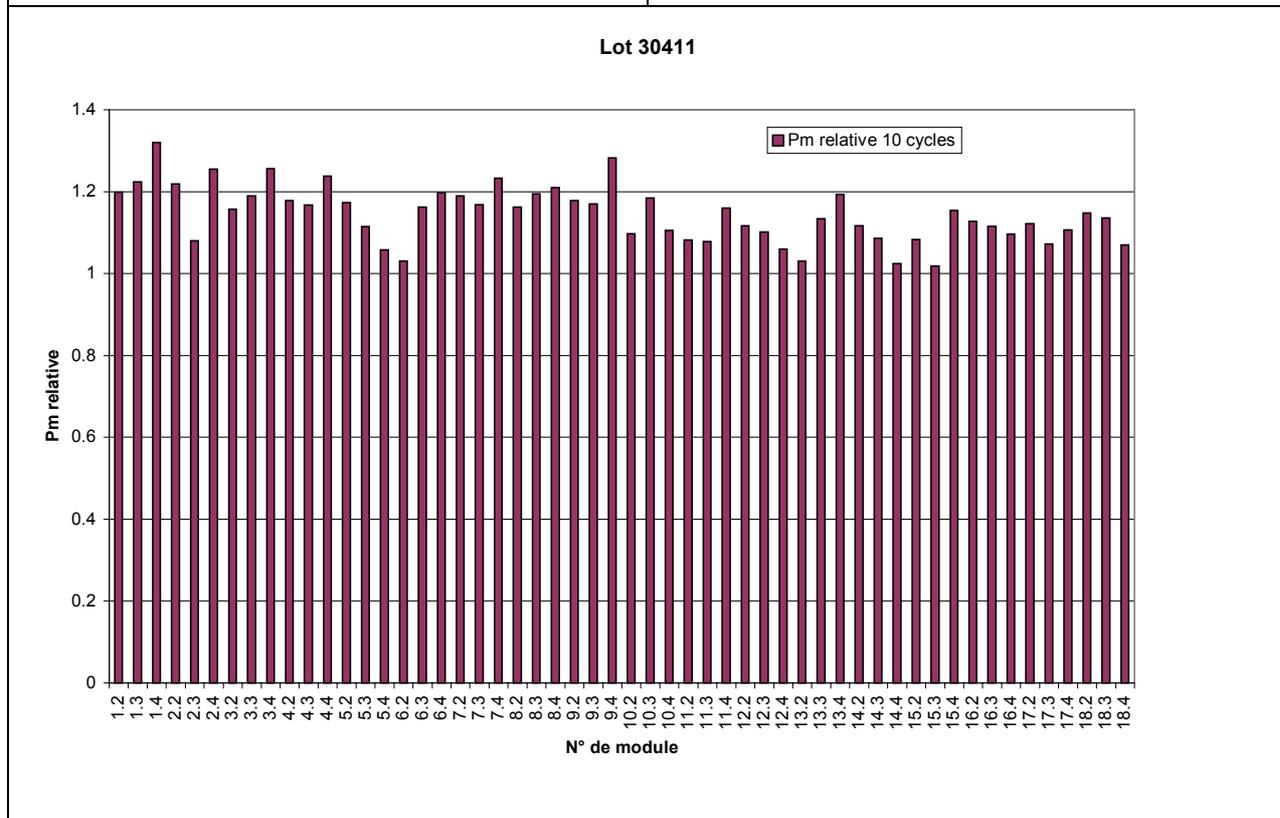
Remarques:

Pelages:

| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
|-------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 54 | 14 | 23 | |
| | 26% | 5.3% | étoiles/fissures |

Performance:

| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
|----------------------------|------------------------------------|
| 57 mW | 114 % |



| <h1>Série 9</h1> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------|----------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Métal: PI/inox/Al | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remarques: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pelages: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | 4 | 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 13 % | 2.1% | étoiles/fissures | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Performance: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Puissance moyenne initiale | | Puissance relative après 10 cycles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 94.7 mW | | 93.7% | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| lot 30425 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <table border="1"> <caption>Relative Power Data from Chart</caption> <thead> <tr> <th>N° de module</th> <th>Pm relative 2 cycles</th> <th>Pm relative 10 cycles</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>16.1</td><td>1.00</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>17.2</td><td>1.03</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>17.3</td><td>1.01</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>18.1</td><td>1.10</td><td>1.02</td></tr> <tr><td>18.2</td><td>1.02</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>18.3</td><td>1.00</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>18.4</td><td>1.03</td><td>0.99</td></tr> <tr><td>19.1</td><td>1.08</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>19.2</td><td>1.02</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>19.3</td><td>0.99</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>19.4</td><td>1.06</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>20.2</td><td>1.03</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>20.3</td><td>1.01</td><td>0.96</td></tr> <tr><td>20.4</td><td>1.02</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>21.1</td><td>1.11</td><td>1.09</td></tr> <tr><td>21.2</td><td>1.02</td><td>0.93</td></tr> <tr><td>21.3</td><td>1.00</td><td>0.91</td></tr> <tr><td>21.4</td><td>1.07</td><td>1.02</td></tr> <tr><td>22.1</td><td>1.10</td><td>1.08</td></tr> <tr><td>22.2</td><td>1.00</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>22.3</td><td>1.03</td><td>0.90</td></tr> <tr><td>22.4</td><td>1.05</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>23.1</td><td>1.04</td><td>0.88</td></tr> <tr><td>23.2</td><td>1.01</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>23.3</td><td>1.02</td><td>0.98</td></tr> <tr><td>23.4</td><td>1.01</td><td>0.95</td></tr> <tr><td>24.1</td><td>1.06</td><td>1.04</td></tr> <tr><td>24.2</td><td>0.55</td><td>0.22</td></tr> <tr><td>24.3</td><td>0.81</td><td>0.75</td></tr> <tr><td>24.4</td><td>0.98</td><td>0.70</td></tr> </tbody> </table> | | | | N° de module | Pm relative 2 cycles | Pm relative 10 cycles | 16.1 | 1.00 | 0.98 | 17.2 | 1.03 | 0.98 | 17.3 | 1.01 | 0.95 | 18.1 | 1.10 | 1.02 | 18.2 | 1.02 | 0.93 | 18.3 | 1.00 | 0.96 | 18.4 | 1.03 | 0.99 | 19.1 | 1.08 | 1.01 | 19.2 | 1.02 | 0.98 | 19.3 | 0.99 | 0.96 | 19.4 | 1.06 | 1.00 | 20.2 | 1.03 | 0.93 | 20.3 | 1.01 | 0.96 | 20.4 | 1.02 | 0.98 | 21.1 | 1.11 | 1.09 | 21.2 | 1.02 | 0.93 | 21.3 | 1.00 | 0.91 | 21.4 | 1.07 | 1.02 | 22.1 | 1.10 | 1.08 | 22.2 | 1.00 | 0.98 | 22.3 | 1.03 | 0.90 | 22.4 | 1.05 | 0.95 | 23.1 | 1.04 | 0.88 | 23.2 | 1.01 | 1.01 | 23.3 | 1.02 | 0.98 | 23.4 | 1.01 | 0.95 | 24.1 | 1.06 | 1.04 | 24.2 | 0.55 | 0.22 | 24.3 | 0.81 | 0.75 | 24.4 | 0.98 | 0.70 |
| N° de module | Pm relative 2 cycles | Pm relative 10 cycles | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16.1 | 1.00 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.2 | 1.03 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.3 | 1.01 | 0.95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.1 | 1.10 | 1.02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.2 | 1.02 | 0.93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.3 | 1.00 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.4 | 1.03 | 0.99 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.1 | 1.08 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.2 | 1.02 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.3 | 0.99 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.4 | 1.06 | 1.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20.2 | 1.03 | 0.93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20.3 | 1.01 | 0.96 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20.4 | 1.02 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.1 | 1.11 | 1.09 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.2 | 1.02 | 0.93 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.3 | 1.00 | 0.91 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.4 | 1.07 | 1.02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.1 | 1.10 | 1.08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.2 | 1.00 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.3 | 1.03 | 0.90 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.4 | 1.05 | 0.95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.1 | 1.04 | 0.88 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.2 | 1.01 | 1.01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.3 | 1.02 | 0.98 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.4 | 1.01 | 0.95 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.1 | 1.06 | 1.04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.2 | 0.55 | 0.22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.3 | 0.81 | 0.75 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.4 | 0.98 | 0.70 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Série 10

Métal: **PI/inox/Al**

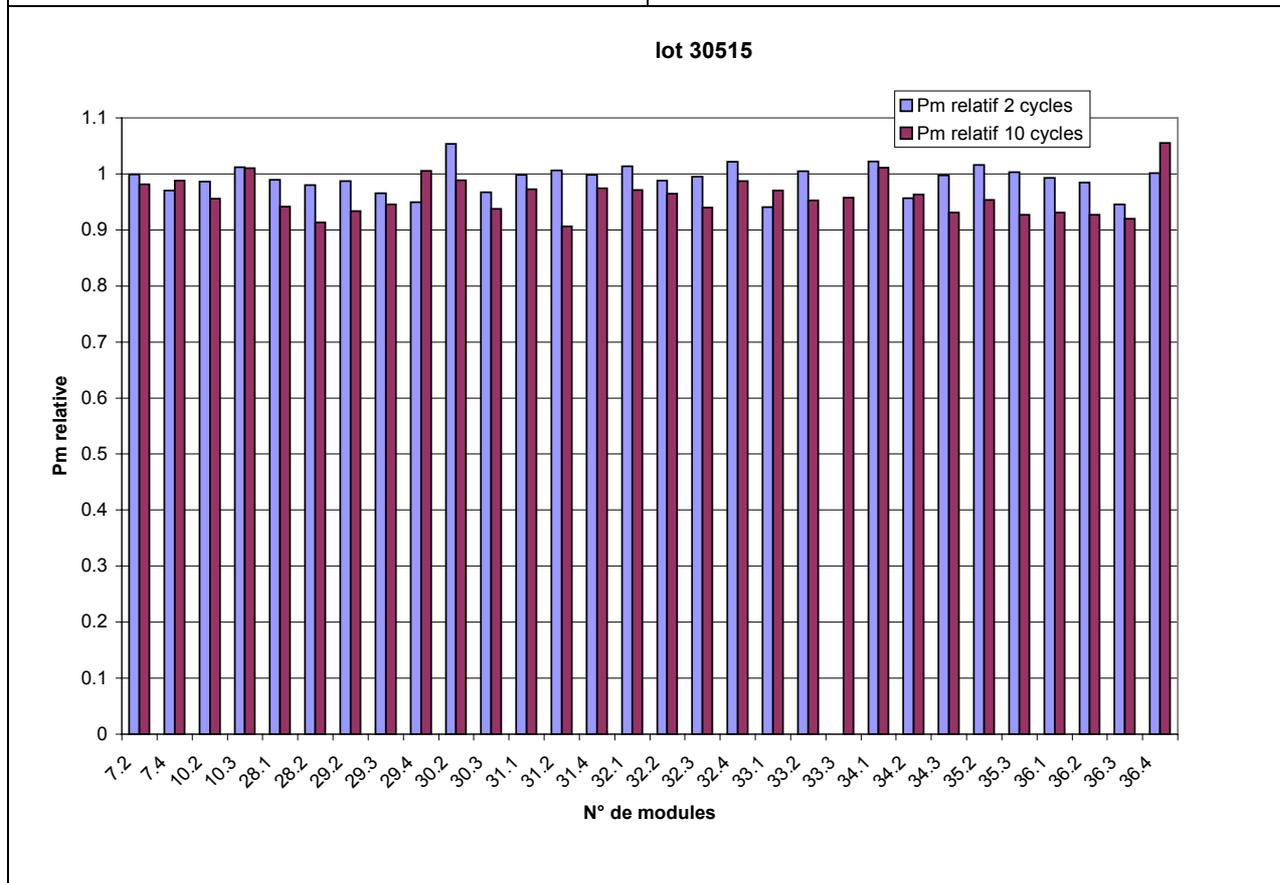
Remarques:

Pelages:

| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
|-------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 30 | 8 | 12 | |
| | 27 % | 5 % | étoiles/fissures |

Performance:

| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
|----------------------------|------------------------------------|
| 70.0 mW | 96% |



Série 11

Métal: **PI/plasma Ar anodique/inox/Al**

Remarques:

Pelages:

| No. modules | No. modules avec pelage | No. cellules avec pelage | Défaut principal |
|-------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 29 | 5 | 6 | |
| | 17 % | 4 % | Étoiles/fissures |

Performance:

| Puissance moyenne initiale | Puissance relative après 10 cycles |
|----------------------------|------------------------------------|
| 82 mW | 95% |

