

Tenue électrique des modules photovoltaïques et de leurs composants en moyenne tension et phénomènes associés.

Marc KELLER ^{1,2}, Pascal RAIN ², Jérémie AIME ¹

¹ Université Grenoble Alpes, CEA, Liten Campus INES, 73370 Le Bourget du Lac, FRANCE

² Université Grenoble Alpes, G2Elab, 21 rue des martyrs, 38031 Grenoble, FRANCE

RESUME – La montée en tension du réseau photovoltaïque (PV) permet d'importantes réductions des coûts CAPEX (Capital Expenditures) de par la diminution des sections de câbles. Cependant, cette augmentation de tension induit une accentuation des effets PID (Potential Induced Degradation) déjà très présents à des tensions inférieures à 1,5 kV. Cette étude se concentre donc sur l'étude électrique de composants comme le verre, l'encapsulant. Sont reportés ici des résultats de mesure confirmant la conductivité ionique dans le verre étudié, présentant les différents comportements des encapsulants face à une augmentation de la tension ainsi qu'une mise en évidence de la migration des ions sodium à travers l'encapsulant, mettant en évidence les mécanismes de dégradation liés à la présence d'une tension électrique. Des premières mesures de dégradation PID à -3 kV DC sur des modules PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) ont permis de souligner l'importance du choix de l'encapsulant, en accord avec les mesures de caractérisation faites au préalable.

Mots-clés— PV, PID, cellule solaire, PERC, encapsulant, verre, conductivité, polarisation

1. INTRODUCTION

L'étude des modules photovoltaïques (PV) capables de résister à -1500 V lors des tests PID, réalisés selon la norme IEC 62804-1, met en évidence l'importance d'une analyse approfondie des propriétés électriques des matériaux constitutifs. Le verre et l'encapsulant, jouant le rôle d'isolants diélectriques, présentent des caractéristiques distinctes, notamment en termes de conductivité électrique et de permittivité, qui influencent directement la résistance des modules PV au PID. Avec l'agrandissement progressif des centrales solaires, les tensions appliquées aux modules photovoltaïques augmentent. Cette évolution permet d'abaisser les coûts des équipements comme les câbles (de section plus petite) et les onduleurs (calibres qui diminuent pour une fiabilité accrue), mais expose les modules à des risques accrus de PID [1]. Ce phénomène, directement lié au champ électrique, se manifeste principalement par la migration d'ions sodium provenant du verre vers la cellule photovoltaïque (PID-s), par une polarisation due à l'accumulation de charges à l'interface encapsulant-cellule (PID-p) ou par la corrosion des cellules solaires (PID-c). Dans ce cadre, la caractérisation des matériaux sous des niveaux de tension plus élevés est essentielle pour identifier les combinaisons optimales capables de limiter la dégradation des modules PV. De nombreuses études se concentrent sur la quantification de la résistance

volumique des encapsulants, la modification des couches de passivation de la cellule solaire [2] ou sur l'utilisation de verre contenant moins de sodium [3] pour réduire ces phénomènes.

Les études dans le domaine photovoltaïque se concentrent souvent sur le paramètre électrique de la conductivité pour expliquer les résultats des tests de dégradation réalisés sur différents types de matériaux diélectriques : l'encapsulant (polymère) et le verre utilisé dans les modules photovoltaïques. La conductivité des polymères est généralement mesurée selon la norme ASTM D257, à une seule tension (1000 V DC) et dans des conditions de 25 °C et 50 % d'humidité relative [4]. Le verre est étudié électriquement moins souvent que les polymères, et les analyses de dégradation s'appuient généralement sur la concentration en sodium dans le verre. Certains phénomènes importants sont souvent omis, tels que la polarisation des électrodes [5], la polarisation interfaciale, l'injection de charges d'espace, l'énergie d'activation de la conductivité ionique dans le verre, et l'impact de l'humidité et de la température sur la conductivité des encapsulants. Ces phénomènes sont introduits dans cette étude pour permettre une meilleure compréhension sur le choix des matériaux pour fabriquer des modules PV résistants à moyenne tension. Des cellules PERC seront, pour la première fois à la connaissance des auteurs, soumis à une tension élevée de -3 kV DC.

L'objectif de cet article est de mettre en évidence les phénomènes de conduction électrique au sein de modules PV par l'étude électrique de différent type de verre, et d'encapsulant mais également d'assemblage multicouche de verre – encapsulant. De plus, le rôle primordial que joue l'encapsulant sera éclairci à l'aide de mesures PID effectuées à moyenne tension.

2. APPROCHES EXPERIMENTALES

2.1. Objets d'études

Les monocouches de verres sont composés : d'un verre borosilicaté d'une épaisseur de 3,3 mm, référencé comme verre A, contenant 3 % en masse d'oxyde de sodium (Na_2O), et des verres B et C, référencés comme des verres sodocalciques (3,2 mm d'épaisseur) contenant 13 % de Na_2O , comme indiqué dans le Tableau 1. Différents polymères d'encapsulation ont été étudiés sous forme de films de 500 μm d'épaisseur en élastomère polyoléfine (POE) ou en oléfine thermoplastique (TPO). Par ailleurs, des assemblages bicouches (verre-polymère) et tricouches (polymère-verre-polymère) ont été laminés pour compléter l'étude.

Tableau 1. Compositions en oxydes en pourcentage massique pour trois verres différents, mesurées par EDX. L'écart type était de 1 % pour chaque oxyde, et le bore n'a pas pu être détecté dans le verre borosilicaté. Le verre C contient également de l'oxyde SnO_2 mais cela n'a pas été indiqué ici.

Oxyde (wt%)	Na_2O	MgO	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Sum
Verre borosilicaté A	3,22		79,43		2,56	85,81
Verre sodocalcique B	13,17	4,49	74,57	8,70	0,21	101,14
Verre sodocalcique C	12,47	3,92	67,97	8,72	1,08	94,16

Les tests PID ont été effectués sur des mini modules PV de 20 cm^2 contenant une demi-cellule PV de taille M6 et de type PERC. Les autres matériaux utilisés sont : le verre sodocalcique C sur la face avant et arrière et plusieurs encapsulants différents : 3 modules avec encapsulant POE et 3 modules avec encapsulant TPO ont été réalisés. Ils ont été cadrés après lamination par des profilés en aluminium sur 3 côtés, le dernier côté étant pris par la boîte de jonction comme montré à la Figure 1.

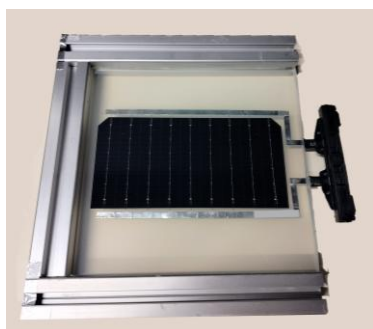


Figure 1. Image d'un mini modules PV de 20 cm^2 composé d'une demi-cellule PERC M6 cadré par des barres de profilé en aluminium.

2.2. Système de mesure de courant

Des mesures de courant ont été réalisées en configuration plan-plan (Figure 2-a). Le système d'électrodes est installé dans une cellule d'essai. L'électrode inférieure est entourée d'une électrode de garde connectée à la masse. La cellule d'essai est placée dans une chambre climatique et connectée d'un côté à une source haute tension et de l'autre à un électromètre. L'ensemble du dispositif est illustré en Figure 1-b. Toutes les mesures ont été effectuées dans des conditions isothermes. Les polymères sont conditionnés en température et en humidité jusqu'à stabilisation avant d'être placés entre les électrodes. Les champs électriques appliqués variaient de 0,25 à 10 kV/mm . Le test consiste en une polarisation d'une heure suivie d'une dépolarisation d'une heure (à 0 V) pour les polymères, en commençant par les tensions et températures les plus basses. Pour les assemblages bicouches et tricouches, la durée de polarisation et de dépolarisation a été étendue à 4 heures. Les mesures ont été effectuées en polarité positive pour tous les niveaux de tension (suivies de leur dépolarisation respective), puis en polarité négative. L'orientation des assemblages bicouches a été définie dans l'ordre suivant, de haut en bas : électrode haute tension, polymère, verre, électrode inférieure. Les échantillons de verre et de polymère ont été conditionnés pendant au moins 4 heures avant la mesure. Des mesures de masse ont montré que cette durée était suffisante pour assurer une stabilisation de l'humidité. Chaque échantillon a été métallisé par pulvérisation cathodique d'or (200 nm) sur les deux faces avant la mesure.

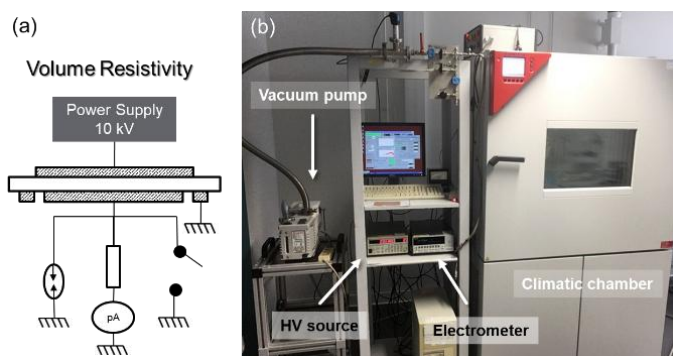


Figure 2. Schéma de la configuration des électrodes (a) et photo du dispositif de mesure (b).

2.3. Spectroscopie diélectrique

Afin de caractériser les propriétés électriques des matériaux, une spectroscopie diélectrique a été réalisée à l'aide d'un analyseur d'impédance à large bande de haute précision. Des mesures diélectriques à haute résolution ont été effectuées dans une gamme de fréquences allant de 100 μHz à 1 MHz pour les assemblages tricouches, et de 1 mHz à 1 MHz pour les monocouches. Le système d'électrodes utilisées est similaire à celui utilisé pour les mesures de courant. Les propriétés diélectriques ont été mesurées dans une enceinte thermique. Les échantillons de verre et de polymère ont été stabilisés thermiquement pendant au moins 4 heures avant la mesure, afin d'atteindre l'équilibre thermique. Toutes les mesures ont été réalisées à 3 V, après avoir vérifié que le verre présentait une réponse électrique linéaire entre la conductivité mesurée et le champ électrique appliqué, condition essentielle pour s'assurer que le signal mesuré reflète bien les propriétés intrinsèques du matériau et non des effets non linéaires. Chaque échantillon a été métallisé par pulvérisation cathodique d'or (200 nm) sur les deux faces avant la mesure.

2.4. Système de mesure de la dégradation PID de mini modules PV.

Le système est basé sur la norme IEC 62804-1 qui effectue les tests PID à 1,5 kV DC à 85 °C, avec 85 % d'humidité relative (RH) pendant 96 heures dans une enceinte climatique (Figure 2). Dans notre cas, seule la valeur de tension a été modifiée pour permettre une étude en moyenne tension.



Figure 3. Mini modules PV dans une enceinte climatique pour le test PID pendant 96 h à 85 °C et 85% RH.

Le courant de fuite de chaque module est ainsi mesuré au cours de l'expérience. Les modules sont mis en conditionnement pendant 8h dans les conditions environnementales décrites ci-dessus avant le début de l'application de la tension.

La dégradation des modules a été suivie en réalisant des mesures électriques I-V dans des conditions normalisées : spectre AM 1.5G, éclairement de 1000 W/m² et température de 25 °C, à l'aide d'un simulateur de flash Spire 5600 SPL. Parallèlement, des images de photoluminescence (PL) et d'électroluminescence (EL) ont été obtenues à l'aide d'un système BT Imaging. Afin d'assurer la cohérence des comparaisons, toutes les acquisitions ont été effectuées avec des réglages constants : un temps d'exposition de 1,3 seconde, un courant injecté de 5,3 A pour l'EL, et une illumination d'intensité équivalente à un soleil pour la PL. Les images ont ensuite été présentées avec une échelle uniforme.

3. RESULTATS PRÉLIMINAIRES

3.1. Mesure de spectroscopie diélectrique de monouche de verre

Trois échantillons de verre ont été mesurés par spectroscopie diélectrique à 3 V et 100 °C. Sont présentés la partie réelle de la conductivité (Figure 4) et la partie réelle de la permittivité (Figure 5).

À haute fréquence, on observe que la partie réelle de la conductivité augmente, car les dipôles ou les porteurs de charge n'ont pas suffisamment de temps pour suivre le champ électrique alternatif. À basse fréquence, une conductivité stable est observée, connue sous le nom de conductivité DC. La conductivité DC des verres sodocalciques B et C apparaît en dessous de 10 Hz, avec des valeurs respectives de 4×10^{-10} et $2,2 \times 10^{-10}$ S/cm. Cette observation est en accord avec la polarisation observée en-dessous de 10 Hz sur la Figure 5, engendrée par la conduction des porteurs de charge mobiles (Na^+) se déplaçant sur de longues distances. De manière similaire, la conductivité DC du verre borosilicaté est observée en dessous de 10^{-1} Hz, ce qui correspond au pic de conduction ionique visible sur la Figure 5.

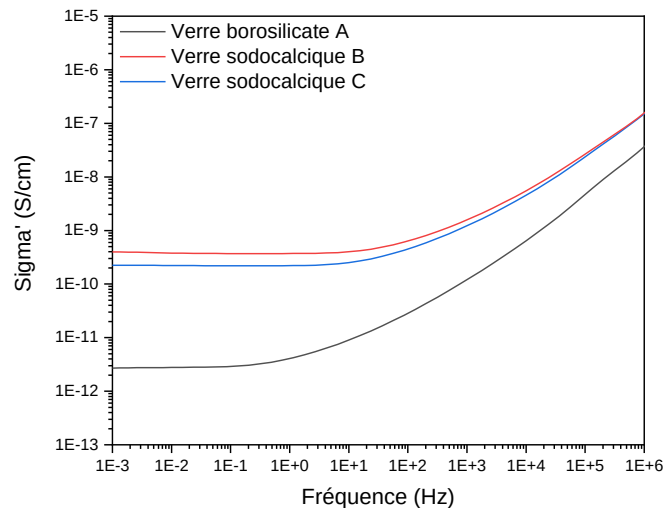


Figure 4. Mesures de spectroscopie diélectrique de trois échantillons de verre différents montrant la partie réelle de la conductivité en fonction de la fréquence à 100 °C.

À des fréquences environ deux ordres de grandeur plus basses, une forte polarisation est observée pour les verres sodocalciques. Les ions Na^+ ont alors suffisamment de temps pour traverser la distance entre les électrodes et s'accumuler à l'interface électrode/verre. Cette polarisation d'électrode débute à 2×10^{-1} Hz et 2×10^{-2} Hz respectivement pour les verres B et C, et se poursuit jusqu'à la fin de la mesure à 10^{-3} Hz.

Ces résultats montrent un facteur 1,8 dans la conductivité entre deux verres quasi identiques en composition. Cela met en évidence qu'une légère variation de composition du verre peut modifier de manière significative la conductivité DC. Cela s'explique généralement par la différence de quantité d'oxygène non lié (NBO) dans le réseau vitreux [6].

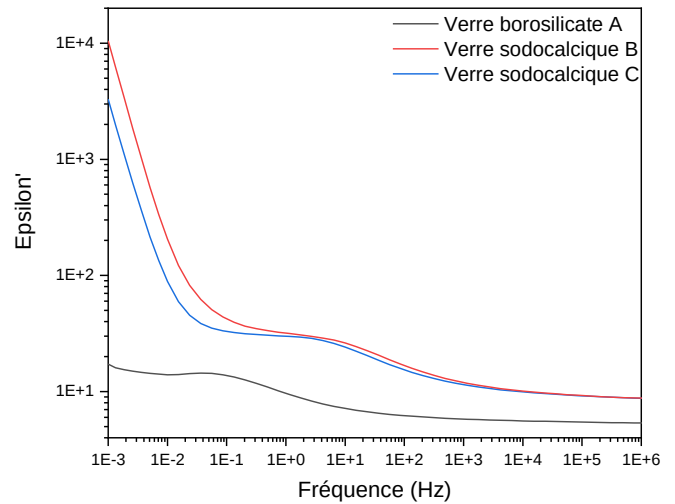


Figure 5. Mesures de spectroscopie diélectrique de trois échantillons de verre différents montrant la partie réelle de la permittivité en fonction de la fréquence à 100 °C.

Alors que les verres sodocalciques B et C présentent une polarisation d'électrode importante (valeur de ϵ allant jusqu'à 10^3), celle-ci n'est pas observée sur le verre borosilicaté A dans la gamme de fréquence étudiée. Cela est en accord avec une conductivité DC qui apparaît à une fréquence plus basse de deux décades (10^{-1} Hz au lieu de 10 Hz).

3.2. Mesure du courant électrique transversal de monocouche d'encapsulant

Les densités de courant des échantillons de polymère TPO et de POE ont été mesurées en appliquant différents niveaux de tension à 85 °C et 40 % d'humidité relative, comme présenté dans la Figure 6. Deux régimes peuvent être observés pour le polymère TPO. En dessous de 2 kV/mm, la pente est proche de l'unité, tandis qu'au-dessus de ce seuil de champ, une pente d'environ 2,5 est mesurée en échelle log-log. La pente linéaire est associée à une conduction ohmique. Le second régime peut être a priori attribué à plusieurs mécanismes, parmi lesquels une conduction de type SCLC (courant limité par charges d'espace). Cette seconde phase est corrélée à l'injection de charges d'espace par les électrodes, qui remplissent les pièges (défauts) situés à des niveaux énergétiques dans la bande interdite du polymère, ce qui génère une augmentation de la densité de courant et donc une variation de la conductivité apparente.

Pour l'échantillon de polymère POE, deux régimes peuvent être également observés. En dessous de 2,7 kV/mm, la pente est inférieure à l'unité (0,2), tandis qu'au-dessus de ce seuil de champ, une pente d'environ 0,8 est mesurée en échelle log-log. La pente du premier régime est associée à une densité de courant limité par l'injection c'est-à-dire par la capacité des électrodes à injecter des charges dans le matériau, plutôt que par le transport de ces charges à travers le matériau lui-même.

Des mesures effectuées à des humidités plus élevées, pour la même température pour le polymère TPO, ont conduit à un seuil de champ plus faible, ce qui démontre que cela doit être sérieusement pris en compte dans l'analyse de la dégradation

PID. C'est particulièrement le cas pour les valeurs de conductivité qui vont dépendre de ces conditions environnementales et qui montrent ici un écart de quasiment 3 ordres de grandeur à moyenne tension entre ces deux polymères.

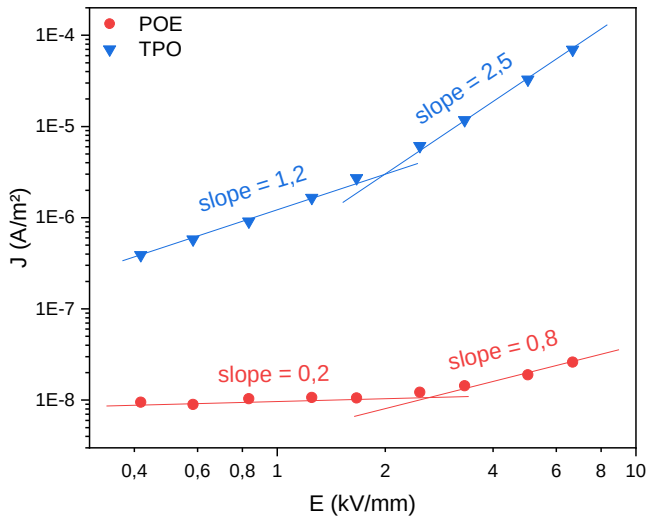


Figure 6. Mesures de densité de courant dans les échantillons de polymère TPO et POE en fonction du champ électrique, à 85 °C et 40 % d'humidité relative.

3.3. Mesure de spectroscopie diélectrique d'un assemblage encapsulant – verre – encapsulant

Un assemblage tricouche polymère-verre-polymère, constitué de TPO et de verre sodocalcique B, a été mesuré par spectroscopie diélectrique à 75 °C, température inférieure au point de fusion du TPO. La Figure 7 représente l'évolution de la partie réelle de la permittivité et de la conductivité en fonction de la fréquence. Le pic de conduction ionique apparaît à 1 Hz dans l'échantillon de verre B, à la même fréquence que dans l'assemblage. La monocouche de verre B présente une polarisation d'électrode en dessous de 2×10^{-1} Hz. Néanmoins, dans le cas de l'échantillon tricouche, la polarisation d'électrode apparaît en dessous de 3×10^{-4} Hz, ce qui semble indiquer une polarisation à une certaine distance de la surface du verre. L'hypothèse d'une polarisation polymère/électrode semble confirmée par l'absence de polarisation interfaciale entre 1 Hz et 3×10^{-4} Hz.

Ce résultat est en bon accord avec l'accumulation de sodium observée à l'interface des cellules solaires [7]. À haute fréquence, la distribution du champ électrique est principalement gouvernée par le comportement capacitif des matériaux. À mesure que la fréquence diminue, les effets résistifs deviennent dominants, avec une transition qui se produit entre 0,5 et 80 Hz. L'encapsulant présente une résistivité plus élevée que le verre, donc avec la baisse de la fréquence, le champ électrique se reporte essentiellement dans le polymère.

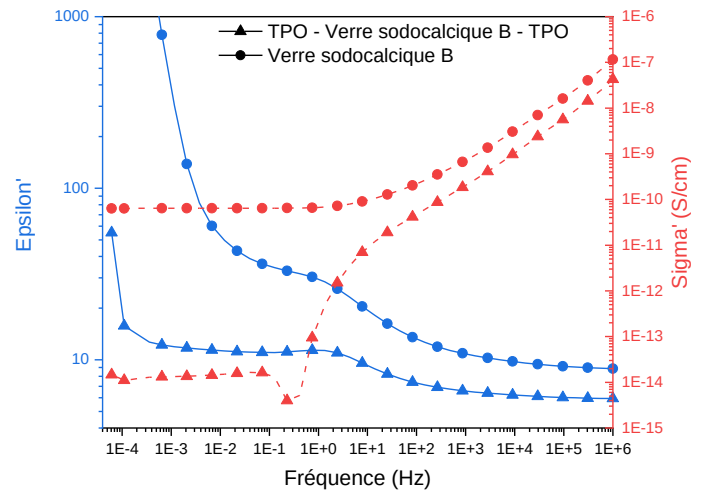


Figure 7. Mesures de spectroscopie diélectrique de l'assemblage tricouche TPO – verre sodocalcique B – TPO et de l'échantillon de verre sodocalcique B, montrant la partie réelle de la conductivité et de la permittivité en fonction de la fréquence à 75 °C. Les symboles ne correspondent pas aux emplacements de mesure, il s'agit de repères utilisés pour distinguer les courbes.

La conductivité de l'assemblage présente une augmentation locale autour de 10^{-1} Hz. Ce phénomène est très atypique. Une augmentation du champ électrique dans le polymère pourrait en être à l'origine. La migration des ions Na^+ vers l'interface verre/polymère provoque en effet une augmentation du champ dans le polymère situé près de l'électrode chargée négativement. Cela peut être corrélé à une légère baisse de la permittivité effective observée à la même fréquence. Des expériences et des simulations supplémentaires sont nécessaires pour comprendre pleinement ce comportement.

3.4. Mesures du courant électrique transversal d'un assemblage verre – encapsulant.

Un assemblage bicouche verre B-POE a été mesuré à tension moyenne (3000 V) pendant 4 heures sous deux polarités : le polymère en contact avec l'électrode négative (cas 1) ou en contact avec l'électrode positive (cas 2), comme illustré à la Figure 8.

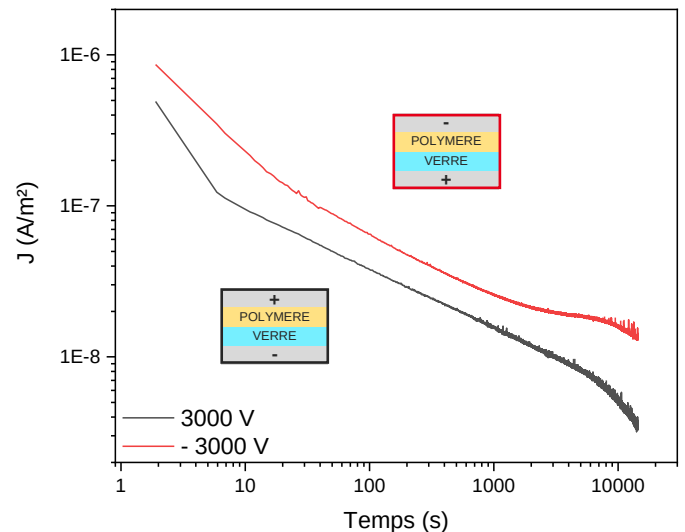


Figure 8. Mesures de densité de courant à +3000 V et -3000 V de l'assemblage bicouche verre sodocalcique B – échantillon POE en fonction du champ électrique à 75 °C et 40 % d'humidité relative.

Les densités de courant mesurées présentent une phase transitoire décroissante qui n'atteint pas un régime stationnaire à la fin de la mesure. Dans le cas 1, la densité de courant après 4 heures est environ 4,3 fois plus élevée que dans le cas 2. Un petit courant stationnaire est observé dans le cas 1 entre 3000 et 7000 secondes. Cela peut être attribué à la conduction à travers le polymère, étant donné que, compte tenu des conductivités respectives des deux matériaux, le champ électrique s'y répartit rapidement.

La légère diminution observée par la suite peut être associée aux migrations des ions sodium à travers le polymère. En effet, le courant est limité par le matériau le moins conducteur, qui est l'agent encapsulant. En régime stationnaire, le champ électrique additionnel causé par les ions doit être pris en compte. L'accumulation des ions Na^+ à l'interface électrode négative/polymère entraîne une diminution du champ à l'intérieur du polymère. Cette hypothèse doit être confirmée par d'autres mesures, comme un assemblage tricouche étudié par spectroscopie diélectrique.

3.5. Etude de la dégradation PID de mini modules PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) à une tension de - 3 kV DC.

La Figure 9 représente la dégradation de P_{max} (Puissance maximale délivrée lorsque le produit courant-tension est optimal), V_{OC} (tension en circuit ouvert), I_{SC} (courant de court-circuit) et FF (facteur de forme) de mini modules alimentés en - 3 kV DC en fonction du type d'encapsulant utilisé et selon les faces du module PV. On constate une altération plus importante de la puissance pour les modules contenant l'encapsulant TPO avec -12 et -23,5% sur la face avant et arrière respectivement. Les modules POE ne subissent qu'une dégradation de P_{max} de -4,3 pour la face avant et de -4,6% pour la face arrière, ce qui signifie que ces modules passent la norme PID IEC 62804-1. Il est également constaté qu'en face avant, les modules TPO ont perdu 3 à 4% de V_{OC} , I_{SC} et FF tandis qu'en face arrière, la perte V_{OC} est similaire à la face avant, la perte d' I_{SC} est supérieure à 18% et la perte de FF diminue à environ 2%. Cette dégradation semble être la signature d'un PID-p en face arrière associé à un PID-s en face avant d'après la littérature [8]. En effet les pertes importantes d' I_{SC} en face arrière sont symptomatiques d'une accumulation de charges sur l'ensemble de l'interface cellule-encapsulant et donc d'un PID-p. Les pertes de FF et de V_{OC} en face avant, quant à elles, sont représentatives d'un « shunting » de la cellule lié à la pénétration de sodium à travers un défaut d'empilement. Ces mécanismes de dégradation ont été observés et confirmés par des mesures EQE (External Quantum Efficiency) non présentées ici.

Les modules POE subissent majoritairement une perte de FF en face avant (-4%) et en face arrière (-3%). Une petite perte d' I_{SC} est quand même visible en face arrière avec -1,3% de dégradation ce qui souligne la diminution très importante de PID-p par l'utilisation de POE. Cette diminution peut s'expliquer par la différence de conductivité importante d'environ 3 ordres de grandeur entre les deux polymères, observée à la Figure 6 et signifie donc qu'il n'y a pas ou peu d'accumulation de charges négatives dans l'encapsulant POE. Néanmoins, il est important de constater que les pertes de FF restent importantes sur les deux faces du module pour l'encapsulant POE, cela indique donc une diminution de la résistance série de la cellule qui peut être synonyme d'une dégradation de l'interconnexion du module ou de pénétration

de sodium à la surface de la cellule. D'autres mesures doivent être effectuées pour comprendre pleinement cette dégradation.

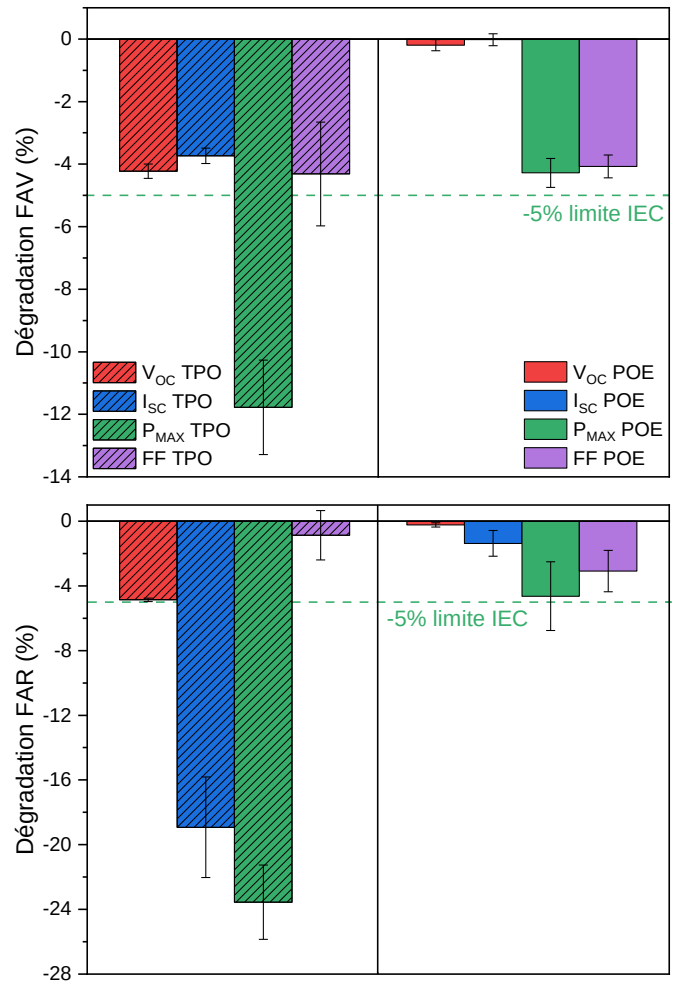


Figure 9. Dégradation de la puissance maximale de mini modules PERC soumis à une tension de - 3 kV DC en fonction du type d'encapsulant utilisé sur la face avant et arrière du module. L'évolution des paramètres V_{OC} , I_{SC} et FF est également représentée.

La Figure 10 représente les images des modules faites avant et après dégradation PID par les techniques d'imagerie de photoluminescence (PL) et d'électroluminescence (EL). Les modules TPO montrent un assombrissement quasiment homogène de la demi-cellule en EL et PL. En effet, les bords supérieurs et inférieurs de la cellule possèdent une zone plus claire synonyme d'une dégradation moins importante. Ces modules ont subi une diffusion de vapeur d'eau qui a été introduite durant le test PID à cause de la valeur élevée de la perméabilité à la vapeur d'eau (WVTR) de ce polymère de 5,3 g/m²/jour. La zone claire pourrait correspondre à une diffusion inverse d'humidité c'est-à-dire de l'intérieur vers l'extérieur du module durant la période de stockage entre la fin de la mesure et la caractérisation par imagerie. Cela pourrait favoriser une diminution de la quantité des charges positives polarisant le module au fil des jours permettant une régénération progressive du module. Les modules POE ne présentent quasiment aucun signe de dégradation excepté quelques petites taches grises qui pourraient être associées à un phénomène de shunting ou de pénétration de sodium et qui expliquerait en partie les pertes de FF importantes mesurées par flash test. D'autres mesures sont attendues pour comparer l'effet du niveau de la tension sur ces mêmes types de module.

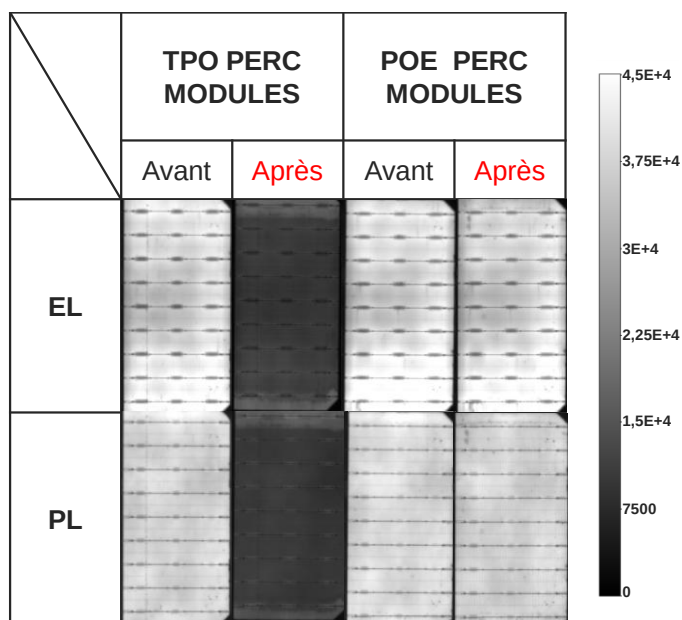


Figure 10. Imagerie EL et PL de mini modules PERC soumis à une tension de -3 kV DC en fonction du type d'encapsulant utilisé avant et après dégradation PID de 96h.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude met en évidence des limites inhérentes de certains composants des modules PV dans leur rôle pour une performance stable dans le temps. Il y a donc une nécessité d'analyser en détail les propriétés électriques des deux matériaux diélectriques : le verre et l'encapsulant (polymère). D'une part, les différents types de verre présentent des variations de conductivité, cependant souvent peu étudiées, ainsi que des différences dans la cinétique de polarisation des électrodes. D'autre part, la conductivité des polymères s'est révélée fortement dépendante des conditions environnementales, des niveaux de tension appliquée mais également de leur structure chimique. C'est pourquoi une valeur de conductivité mesurée à 25 °C, 50 % d'humidité relative et 1000 V ne peut être considérée comme représentative des conditions standards de test PID (85 °C, 85 % HR, 1500 V), et encore moins des tests PID en moyenne tension. Les assemblages tricouche ont mis en évidence l'intérêt des mesures de spectroscopie diélectrique pour localiser et quantifier les différents types de polarisation selon les matériaux utilisés. Enfin, les mesures de densité de courant ont révélé une différence de distribution du champ électrique dans le polymère à -3000 V et +3000 V, attribuée à la migration des ions sodium à travers le polymère. Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles approches pour étudier les effets PID sans recourir à des tests coûteux sur des modules photovoltaïques de taille réelle. Des investigations complémentaires, basées notamment sur des techniques comme l'observation des charges d'espace, le TOF-SIMS ou le courant de dépolarisation stimulé thermiquement (TSDC), sont nécessaires pour

approfondir la compréhension du phénomène. Enfin, les premiers résultats de test PID sur des modules PERC à -3 kV ont permis de mettre en avant la nécessité de bien choisir le polymère dans l'assemblage des matériaux du module car il joue un rôle crucial de par sa conductivité et sa perméabilité à la vapeur d'eau. Les mécanismes de dégradation sont similaires à ce qui est observé à 1,5 kV, puisque les paramètres électriques des modules (P_{max} , V_{OC} , I_{SC} et FF) sont dégradés de la même manière mais probablement avec une amplitude plus importante. Des mesures de comparaison dans les mêmes conditions à plus faible tension et d'autres à moyenne tension, sont en cours pour améliorer la compréhension des phénomènes PID, en particulier celui de la polarisation au niveau de l'interface encapsulant-cellule.

5. REMERCIEMENTS

Cette étude a été dirigée par la Société nationale des chemins de fer français (SNCF) dans le cadre du projet RACCOR-D, soutenu par le programme d'investissement d'avenir France 2030 (ANR-10-IEED-0014-01). Un soutien supplémentaire a été apporté par l'Institut Carnot "Énergie du Futur" dans le cadre d'une collaboration entre le CEA et le G2Elab.

6. REFERENCES

- [1] Yamaguchi, Seira, et al. "Potential- Induced Degradation in High- Efficiency N- Type Crystalline- Silicon Photovoltaic Modules: A Literature Review". Solar RRL, vol 5, no 12, Desember 2021, bl 2100708.
- [2] Yamaguchi, Seira, et al. "Effects of Passivation Configuration and Emitter Surface Doping Concentration on Polarization-Type Potential- Induced Degradation in n-Type Crystalline-Silicon Photovoltaic Modules". Solar Energy Materials and Solar Cells, vol 226, Julie 2021, bl 111074.
- [3] Oh, Jaewon, et al. "Potential-Induced Degradation (PID): Incomplete Recovery of Shunt Resistance and Quantum Efficiency Losses". IEEE Journal of Photovoltaics, vol 5, no 6, November 2015, bl 1540–48.
- [4] Hara, Kohjiro, et al. "Crystalline Si Photovoltaic Modules Functionalized by a Thin Polyethylene Film against Potential and Damp-Heat-Induced Degradation". RSC Advances, vol 5, no 20, 2015, bl 15017–23.
- [5] Abouhaswa, A. S., et al. "Characterization of Zinc Lead-Borate Glasses Doped with Fe³⁺ Ions: Optical, Dielectric, and Ac-Conductivity Investigations". Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol 31, no 19, Oktober 2020, bl 17044–54.
- [6] Amara, C. Ben, et al. "Effect of Iron Oxide on the Electrical Conductivity of Soda-Lime Silicate Glasses by Dielectric Spectroscopy". Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol 30, no 14, Julie 2019, bl 13543–55.
- [7] Lausch, Dominik, et al. "Sodium Outdiffusion from Stacking Faults as Root Cause for the Recovery Process of Potential-Induced Degradation (PID)". Energy Procedia, vol 55, 2014, bl 486–93.
- [8] Molto, Cécile, et al. "Review of Potential- Induced Degradation in Bifacial Photovoltaic Modules". Energy Technology, vol 11, no 4, April 2023, bl 2200943.