

## Proposition sujet de thèse 2024

### *Étude de nouvelles formulations de verres pour les modules photovoltaïques : de l'éco-conception à l'optimisation des propriétés optiques, mécaniques, et de durabilité*

---

Directeur de thèse	Frédéric ANGELI
Tuteur CEA	Nicolas BISBROUCK DES/DPME/SEME – Commissariat à l'Energie Atomique Centre de Marcoule – Bagnols-sur-Cèze Tel : 04 66 79 63 96, <a href="mailto:nicolas.bisbrouck@cea.fr">nicolas.bisbrouck@cea.fr</a>
Co-encadrement CEA	Elise Régnier, Romain Couderc
Ecole doctorale	I2S (ED 166)
MASTER 2 ou équivalent souhaité	Sciences des matériaux
Financement	CFR - PSOL
Lieu de travail	CEA Marcoule/INES Chambéry

#### **CONTEXTE**

La Stratégie Nationale Bas Carbone prévoit d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 afin de lutter contre le changement climatique. Répondre à cet objectif ambitieux nécessite entre autres une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, une modification du mix énergétique actuel au profit d'une production bas-carbone, une amélioration de l'efficacité énergétique et la mise en place d'une économie circulaire. La conception de nouveaux modules photovoltaïques, l'optimisation de leur durée de vie et/ou de leur efficacité, ou encore la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> tout au long de leur chaîne de valeur sont des pistes pour contribuer activement à ces objectifs.

De nombreux facteurs environnementaux sont susceptibles de dégrader les modules photovoltaïques, tels que les rayonnements UV, l'humidité, la grêle, la neige<sup>1-3</sup>.... Ainsi, leur conception doit prendre en compte ces différentes contraintes pour que le module puisse y résister et durer dans le temps. Cela passe par le choix de matériaux adaptés et par une combinaison optimale de ces derniers.

Actuellement, il existe plusieurs normes qui régissent les tests de durabilité des modules photovoltaïques, décrivant notamment les différentes séquences de tests auxquelles un module va devoir résister. Une des dégradations les plus éprouvantes est celle liée à l'introduction d'humidité dans le module : cette dernière engendre une détérioration des propriétés du verre, matériau essentiel au sein de la structure du module photovoltaïque, engendrant ensuite des dégradations au niveau des cellules solaires.

Particulièrement, la présence d'humidité va induire une diffusion d'ions positifs mobiles comme le sodium du verre vers la cellule, entraînant une perte d'efficacité importante et prématurée du module. Parallèlement, elle va également renforcer un autre phénomène de dégradation des modules : la dégradation induite du potentiel (PID), dépendante de la composition du module et responsable d'une perte de puissance pouvant aller jusqu'à 50%<sup>4</sup>. Lorsque qu'une différence de potentiel importante existe entre le matériau semi-conducteur et les autres éléments du module, celle-ci entraîne une

migration ionique délétère. L'étude, la compréhension et la diminution de l'occurrence de ces phénomènes physico-chimiques est donc indispensable pour améliorer la durée de vie des modules, ou encore déployer des centrales photovoltaïques moyenne tension. Ces dernières représentent un levier important pour le développement de la production énergétique, car elles permettent notamment une réduction des coûts d'installation et de maintenance grâce à la diminution des longueurs de câbles nécessaires pour interconnecter les strings de modules aux onduleurs de la centrale. Cela permet d'envisager également de diminuer le nombre de sous-stations de par l'augmentation de la longueur des modules mis en série.

Le verre est donc de fait un matériau sensible au sein du module, dont l'optimisation permettrait également une réduction substantielle des émissions carbonées au cours de son cycle de vie<sup>5</sup>. Outre une plus grande résistance à l'altération en milieu humide, une amélioration des propriétés mécaniques pourrait permettre aussi bien un amincissement des plaques de verre – et donc une économie de matière et diminution du poids des modules permettant de nouvelles applications – qu'une augmentation de la durée de vie des modules<sup>6</sup>. Parallèlement, une amélioration des propriétés optiques pourrait permettre quant à elle une efficacité accrue des cellules photovoltaïques en améliorant la transmittance sur la gamme spectrale d'intérêt<sup>7</sup>. L'optimisation de la formulation verrière pourrait permettre également de favoriser le recyclage de ces verres en évitant par exemple le recours à des éléments potentiellement toxiques tels que l'antimoine couramment utilisé dans les modules actuellement importés de Chine. Enfin, l'utilisation de matières premières secondaires issues de circuits courts sera considérée, dans l'objectif de se diriger vers une fabrication de verres éco-conçus avec implantation potentielle sur le territoire national.

## **DEROULEMENT DE LA THESE**

Ce travail de thèse vise donc à étudier et proposer de nouvelles formulations verrières en prenant en compte les différentes contraintes de l'application photovoltaïque afin notamment de lutter efficacement contre ces dégradations sous environnement humide. Dans un premier temps, une étude bibliographique sera menée sur les solutions existantes ainsi que les contraintes spécifiques associées au domaine du photovoltaïque. A la suite de cette étude, plusieurs verres seront formulés, élaborés et caractérisés en laboratoire afin d'en tester particulièrement les propriétés mécaniques (résistance à la fracturation, module de Young, ...), optiques (impact du redox sur la transmittance, ...) et chimiques (tests de lixiviation, altération en enceinte climatique, ...). Les différents moyens de caractérisations sont accessibles au sein des laboratoires du SEME et du LSA. Particulièrement, la formulation de verres à bas point de fusion ou issus de matières premières secondaires sera étudiée afin d'en évaluer la faisabilité pour apporter un gain sur le bilan carbone. Cette formulation pourra s'appuyer sur la modélisation statistique des propriétés physiques des verres (viscosité, conductivité électrique, etc...) développée au LFCM, capitalisant plusieurs années d'expertise du laboratoire sur le lien composition des verres – propriétés physiques. In fine, certains de ces verres seront sélectionnés pour fabriquer des modules photovoltaïques afin d'en tester la compatibilité ainsi que le vieillissement sous chaleur humide et ainsi déterminer les compositions de verres les plus prometteuses. Pour faire sens, l'optimisation de la composition des verres sera intégrée à une analyse de cycle de vie qui pourra être réalisée au sein de la CVI de l'ISEC afin, entre-autres, de minimiser l'impact environnemental et éviter le recours à des éléments toxiques ou en tension.

Cette thèse effectuée au Laboratoire de Formulation et Caractérisation des Matériaux minéraux (DPME/SEME/LFCM) du centre CEA de Marcoule, en étroite collaboration avec le laboratoire des systèmes appliqués (LITEN/DTS/LSA), dont la mutualisation des compétences permettra une approche globale de la problématique. Elle sera dirigée par Frédéric Angeli (CEA Marcoule), rattaché à l'école

doctorale I2S (ED 166) et co-encadrée par Nicolas Bisbrouck (LFCM), Elise Régner (LFCM) et Romain Couderc (LSA).

## REFERENCES

1. Park, N. C., Oh, W. W. & Kim, D. H. Effect of Temperature and Humidity on the Degradation Rate of Multicrystalline Silicon Photovoltaic Module. *Int. J. Photoenergy* **2013**, e925280 (2013).
2. Moutinho, H. R. *et al.* Adhesion mechanisms on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness, and particle shape and size. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **172**, 145–153 (2017).
3. Damo, U. M., Ozoegwu, C. G., Ogbonnaya, C. & Maduabuchi, C. Effects of light, heat and relative humidity on the accelerated testing of photovoltaic degradation using Arrhenius model. *Sol. Energy* **250**, 335–346 (2023).
4. Huang, J., Li, H., Sun, Y., Wang, H. & Yang, H. Investigation on Potential-Induced Degradation in a 50 MWp Crystalline Silicon Photovoltaic Power Plant. *Int. J. Photoenergy* **2018**, 3286124 (2018).
5. Furszyfer Del Rio, D. D. *et al.* Decarbonizing the glass industry: A critical and systematic review of developments, sociotechnical systems and policy options. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **155**, 111885 (2022).
6. Belançon, M. P., Sandrini, M., Zanuto, V. S. & Muniz, R. F. Glassy materials for Silicon-based solar panels: Present and future. *J. Non-Cryst. Solids* **619**, 122548 (2023).
7. Allsopp, B. L. *et al.* Towards improved cover glasses for photovoltaic devices. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **28**, 1187–1206 (2020).

## Résumé en français

La Stratégie Nationale Bas Carbone prévoit d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 afin de lutter contre le changement climatique. Répondre à cet objectif ambitieux nécessite entre autres une réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, une modification du mix énergétique actuel au profit d'une production bas-carbone, une amélioration de l'efficacité énergétique et la mise en place d'une économie circulaire. La conception de nouveaux modules photovoltaïques, l'optimisation de leur durée de vie et/ou de leur efficacité, ou encore la minimisation des émissions de CO<sub>2</sub> tout au long de leur chaîne de valeur sont des pistes pour contribuer activement à ces objectifs.

De nombreux facteurs environnementaux sont susceptibles de dégrader les modules photovoltaïques, et notamment l'introduction d'humidité dans le module : cette dernière engendre une détérioration des propriétés du verre, induisant des dégradations au niveau des cellules solaires.

Ce travail de thèse vise donc à étudier et proposer de nouvelles formulations verrières en prenant en compte les différentes contraintes de l'application photovoltaïque afin de lutter efficacement contre ces dégradations sous environnement humide. Après une étude bibliographique menée sur les solutions existantes et les contraintes spécifiques associées au domaine du photovoltaïque, plusieurs verres seront formulés, élaborés et caractérisés en laboratoire afin d'en tester particulièrement les propriétés mécaniques, optiques et chimiques. La formulation de verres à bas point de fusion ou issus de matières premières secondaires sera également explorée. Enfin, ces verres seront utilisés pour fabriquer des modules photovoltaïques afin d'en tester la compatibilité ainsi que le vieillissement sous chaleur humide et ainsi déterminer les compositions de verres les plus prometteuses.

Le/la doctorant/doctorante bénéficiera des compétences reconnues des laboratoires d'accueil aussi bien sur la formulation de verres et l'étude de leurs propriétés physico-chimiques que leur intégration et validation dans des modules photovoltaïques. L'ensemble des moyens mis à disposition permettra une approche globale du sujet, en travaillant sur une thématique en pleine expansion et porteuse de forts enjeux industriels, écologiques et sociétaux. L'expérience acquise pendant ce travail interdisciplinaire pourra se valoriser dans le domaine des matériaux et de leur intégration dans de nouvelles filières pour la transition énergétique.

Compétences recherchées : matériaux, verres, caractérisation, travail en équipe, goût pour l'expérimentation, bon niveau d'anglais.

### Résumé en anglais

The Low Carbon National Strategy plans to reach carbon neutrality by 2050 to fight against climate change. Meeting this ambitious target requires, amongst others, a reduction in CO<sub>2</sub> emissions, a shift in the current energy mix towards low-carbon production, an improvement in energy efficiency and the development of a strong circular economy. Designing new photovoltaic panels, optimising their lifespan and/or efficiency, and minimising CO<sub>2</sub> emissions throughout the value chain are ways of actively contributing to these objectives.

Photovoltaic panels can be damaged by a number of environmental factors, including the introduction of moisture into the module, which induces deterioration of the glass, thus damaging the solar cells.

The aim of this thesis is therefore to study and propose new glass formulations that take into account the various constraints of the photovoltaic application in order to effectively combat this degradation in a humid environment. Following a literature review of existing solutions and the specific constraints associated with photovoltaics, several glasses will be formulated, developed and characterised at laboratory scale in order to test their mechanical, optical and chemical properties. The formulation of glasses with low melting points or derived from secondary raw materials will also be explored. Finally, these glasses will be used to manufacture photovoltaic modules in order to test their compatibility and their damp ageing, thus determining the most promising glass compositions.

The PhD student will benefit from the recognised skills of the host laboratories, both in the formulation of glasses and the study of their physico-chemical properties, and in their integration and validation in photovoltaic modules. All of the resources made available will enable a global approach to the subject, working on a fast-growing topic with major industrial, ecological and societal implications. The

experience acquired during this interdisciplinary work will be useful in the field of materials and their integration into new sectors for the energy transition.

Skills required: materials, glass, characterisation, teamwork, taste for experimentation, good level of English.