n°40374

UNIVERSITÉ LILLE I – Sciences et Technologies
Ecole Doctorale de Lille

THÈSE DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de

Docteur en Automatique, Génie informatique, Traitement du Signal et des Images

Présentée par

Christophe NOCITO

Développement d'un textile intégrant des cellules photovoltaïques pour application de protection solaire store enroulable

Thèse présentée et soutenue à Lille le 03 Novembre 2010 devant le jury composé de :

DIRECTEUR - KONCAR Vladan- Professeur-ENSAIT Roubaix
CO-ENCADRANT - BOUSSU François- Maître de Conférences-ENSAIT Roubaix
RAPPORTEUR - KACEM Imed-Professeur-Université Metz
RAPPORTEUR - RENNER Marc - Professeur – INSA Strasbourg
MEMBRE - CRISTIAN Irina - Maître de Conférences - Université Technique Gheorghe Asachi Roumanie
MEMBRE - CHRISTOV Nicolaï - Professeur - Université Lille 1 Sciences et Technologies
INVITE - DELEPLANQUE Eugène - PDG - Dickson-Constant Wasquehal
INVITE - RAYMOND Laurent- Directeur R&D – Dickson-Constant Wasquehal

Résumé

Le développement de matériaux permettant la fabrication de bâtiments à « énergie positive » est une préoccupation importante. Les solutions existantes consistent soit à économiser de l'énergie, soit à la produire. Nous proposons de développer un store photovoltaïque rassemblant ainsi les deux fonctions : diminuer la consommation d'énergie en apportant une régulation thermique et la production de l'énergie électrique.
Le produit ainsi conçu, peut aussi être utilisé dans des domaines autonomes (camping-cars, bateaux) afin de favoriser une utilisation nomade ou des domaines connectés au réseau électrique (résidentiels).
Le développement d'une telle application nécessite l'utilisation de panneaux photovoltaïques souples, légers, fins, dont les rendements de production surfaciques sont les meilleurs possibles. La possibilité de rangement du panneau photovoltaïque autour d'un tube cylindrique permet d'améliorer leur intégration architecturale et un encombrement minimum.
A cette fin, il est utile d'intégrer des capteurs photovoltaïques au textile. L'intégration des cellules photovoltaïques est réalisée par un procédé de lamination continu différent des procédés conventionnels.
Afin de s'assurer de la faisabilité d'un tel produit, des prototypes ont été réalisés pour connaître les difficultés rencontrées lors des étapes successives de montage. De plus, ceux-ci ont permis d'effectuer des mesures dans des conditions réelles et comparer ainsi la solution développée aux solutions existantes.

Mots-clés : Protection Solaire, Store, photovoltaïque, lamination, textile.

Development of photovoltaic textile for retractable solar protection

Abstract

Developing new materials to make positive energy buildings is an important issue.
Solutions currently in existence are either energy saving or energy production. We are proposing a photovoltaic awning which has both functions: decreasing the energy consumption and producing the electricity.
This new product can be used as an off-grid system (RV-awning, marine) for nomad use or as an on-grid systems (residential).
Such application development needs the photovoltaic technology thin, light, flexible and as efficient as possible. The storage space around the cylindrical roll allows improving the architectural integration and minimal size.
In order to realize this novel product, the bonding of photovoltaic cells to the textile structure (lamination) is necessary. This part of the project has been realized with a new roll-to-roll process different from the conventional one.
Prototypes have been made in order to acquire knowledge and experience related to difficulties that may occur at the next step of the realization. Moreover, various tests have been done to compare other technologies to the photovoltaic awning.

Keywords : Solar Protection, Awning, photovoltaic, lamination, textile.

Cette thèse s'est déroulée dans le cadre d'une bourse CIFRE entre :

- ✓ L'entreprise Dickson-Constant, au sein du département Recherche et Développement



- ✓ Laboratoire GEMTEX



Remerciements

J'achève la rédaction de la description de trois années de travail par cette section.
Ces mots avec lesquels je termine ma rédaction de thèse sont paradoxalement ceux qui seront lus en premier. Les résultats obtenus sont le fruit d'un travail collectif, c'est pour cela que je tiens à remercier les personnes qui ont œuvré de près ou de loin pour la réalisation de mes travaux de recherche.

Ce travail a pu être réalisé grâce à la confiance que m'a accordée Eugène Deleplanque, président directeur général de l'entreprise Dickson-Constant. Je tiens également à remercier Laurent Raymond le directeur du département Recherche et Développement de l'entreprise Dickson-Constant grâce à qui j'ai pu intégrer l'entreprise au sein de son département. Je tiens aussi à remercier OSEO pour le cofinancement du projet.

Un grand merci à Vladan Koncar et François Boussu de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Industries Textiles (ENSAIT) pour m'avoir aidé tout au long de ces travaux.

Je remercie également Imed Kacem et Marc Renner qui ont bien voulu être rapporteurs sans pour autant me connaître.

Merci à l'ensemble de l'équipe Recherche et Développement. J'adresse tout particulièrement mes remerciements à Damien Chomette pour son aide, son application lors des tests et nos échanges de réflexion ponctués par des discussions animées que nous avons entretenues tout au long des travaux !
Merci aussi à Marielle Oriol qui m'a présenté l'entreprise lors de mon arrivée, facilitant ainsi mon intégration.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement « notre » Gonzague Dutoo pour ses relectures, ses avis ainsi que ses explications concernant la transmission énergétique.

De nombreuses personnes de différents services de l'entreprise Dickson-Constant ont aussi œuvré pour la réalisation du projet de par leur disponibilité et leurs compétences.
Ainsi, je tiens à leur faire part de ma gratitude. Je remercie Herculano Pacheco directeur de l'usine, Fabrice Williate, Jean-Marie Poulain et Jean-Pierre Canva ainsi que toutes les personnes constituant le service maintenance grâce à qui beaucoup de travaux ont pu être réalisés.
De plus, je remercie Christophe Croenne responsable du service informatique et Stéphane Rogue pour leur disponibilité lors de la conception des logiciels informatiques qui nous ont permis de réaliser les tests.
Je remercie aussi Brigitte Wolf, juriste dans l'entreprise Dickson-Constant, pour son aide concernant les procédures juridiques compliquées !
Merci aussi à l'ensemble du personnel de l'entreprise Dickson-Constant qui a contribué à la réalisation de ces travaux.

Je tiens à remercier ma famille qui m’a toujours soutenu tout au long de cette thèse de doctorat.
Merci à Claire pour son soutien quotidien ainsi que pour ses relectures.
Parce que la réussite résulte d’un équilibre subtil entre la vie professionnelle, familiale et les loisirs, je tiens à remercier toutes les personnes qui m’ont encadrées et formées dans le sport ou dans mes études.

Sommaire

RESUME I

ABSTRACT II

REMERCIEMENTS V

I. INTRODUCTION GENERALE 3

II. ETAT DE L'ART 7

II.1. Textiles intelligents 7
II.1.A. Définitions 7
II.1.B. Textiles et énergie électrique 8
II.1.C. Connectique 8

II.2. Cellules Photovoltaïques 9
II.2.A. Définition 9
II.2.B. Effet photovoltaïque 9
II.2.C. Répartition géographique de l'ensoleillement 20
II.2.D. Production 24
II.2.E. Applications 25
II.2.F. Technologies 34

II.3. Matériaux Composites 49
II.3.A. Définition 49
II.3.B. Composites photovoltaïques rigides 49
II.3.C. Composites photovoltaïques souples 50

II.4. Les stores résidentiels 53
II.4.A. Particularités des stores camping-cars 58
II.4.B. Description 58
II.4.C. Les différents composants d'un store 59

III. REALISATION D'UN TISSU PHOTOVOLTAÏQUE 61

III.1. Mise en Œuvre 61
III.1.A. Les cellules photovoltaïques utilisées dans le cadre de l'étude 61
III.1.B. Disposition de la cellule sur la toile destinée au store camping-car 72
III.1.C. Disposition de la cellule sur toile destinée au store résidentiel 102
III.1.D. Analyse et perspectives 108
III.1.E. Perspective de disposition des cellules sur la toile 110

IV. LAMINATION 115
IV.1.A. Les essais réalisés 115
IV.1.B. Qualification de la toile 119
IV.1.C. Diminution des plis sur la toile 127

IV.2. Conclusion 187

V. MESURES & PERFORMANCES 189

V.1. Les différents tests mis en place 189
V.1.A. Etat de l'art 189
V.1.B. Les prototypes à tester 190
V.1.C. Résultats 213
V.1.D. Conclusion 215

VI. CONCLUSION GENERALE 217

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 221

ANNEXES CCXXXI

Etat de l'art ccxxxi
Les matériaux utilisés ccxxxi

Les méthodes de lamination ccxxxvi
Tests caractéristiques techniques ccxli

Tests de matières cclxvi

Contraintes cclxx
Conditionnement et disposition cclxx
Dimensions de l'adhésif cclxx
Durée de vie cclxxi

Test d'adhérence des matières thermoplastiques cclxxii
Choix de la matière et définition du complexe à laminer cclxxii
Adésia cclxxii
Adhetec cclxxiv

Les adhésifs thermoplastiques cclxxvii
Test de lamination EVA / ETFE et TPU / ETFE cclxxvii

I. Introduction générale

L'énergie électrique que nous utilisons au quotidien en France est essentiellement produite par des centrales nucléaires. Or, nous savons depuis longtemps que ces centrales nucléaires ne sont pas sans dangers. De plus, il est nécessaire d'enfouir les déchets nucléaires pour éviter toute dispersion dans l'environnement.
Trouver et utiliser de nouvelles sources d'énergies devient une priorité mondiale. Si les réserves d'énergies fossiles ont des limites, l'énergie solaire est inépuisable.

La Terre reçoit en moyenne en une année 754 millions de TW.h d'énergie solaire au niveau de la mer ce qui est bien supérieur à la production électrique mondiale en 2007 (19 854 TW.h) [1, 2].

Cependant, la construction de centrales solaires demande beaucoup d'espace avec des terrains exposés le plus possible aux rayonnements solaires. En outre, l'utilisation d'une énergie renouvelable telle que l'énergie solaire ne doit pas être faite au détriment des forêts. Quel serait aussi le rendu esthétique de ces grands espaces de champs photovoltaïques ?

Au vu de telles remarques, comment peut-on dès aujourd'hui optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans nos milieux urbains ? Quelle serait la meilleure solution pour allier esthétisme et production d'énergie électrique ? Comment peut-on rapidement trouver une solution efficace et suffisamment propre pour épargner nos forêts ? Doit-on encore centraliser la production de l'énergie électrique utilisée localement de manière extrêmement décentralisée ?

Voici les questions auxquelles l'entreprise Dickson-Constant a tenté de répondre en lançant son programme de Recherche et Développement visant à ajouter une fonction supplémentaire aux tissus de protection solaire. En effet, ces tissus, dont la fonction principale est de protéger contre une exposition prolongée au soleil, peuvent être une solution à l'intégration des panneaux photovoltaïques dans nos villes.

Avec une capacité de production de 25 millions de mètres carrés de toile de store par an et sa présence dans plus de 100 pays, Dickson-Constant est le leader mondial de tissus pour la protection solaire. Son appartenance à la société Glen Raven basée aux Etats-Unis et reconnue comme un leader dans le domaine des tissus techniques en fait un acteur idéal pour un tel développement.

Afin de répondre aux demandes des différents marchés correspondants à l'activité de la société, plusieurs applications du composite tissu photovoltaïque ont été imaginées. Ces applications peuvent être rapportées à un besoin d'autonomie ou de revente de l'énergie aux distributeurs d'électricité existants.
Pour la revente, les stores sont des supports idéaux. En effet, la surface utilisable est très importante et quasiment toutes les devantures de magasins, hôtels et restaurants sont équipées de stores bannes.

Concernant les applications autonomes, c'est dans le domaine marin et du camping-car que la demande est la plus forte. Dans le domaine des activités marines, l'utilisation de l'énergie solaire peut être une alternative à l'utilisation de générateurs thermiques (moteurs) pour la production de l'électricité. Le composite tissu photovoltaïque serait mis en place sur le taud ou le bimini dont la première fonction est de protéger les utilisateurs des rayons du soleil. Concernant le camping-car, le support le plus adapté est également le store. La problématique du camping-car est proche de celle du domaine résidentiel car le support envisageable est aussi un store.
Il faut cependant que le panneau solaire utilisé soit souple et léger afin de ne pas trop rigidifier et alourdir le matériau de base.

Ce mémoire décrit la démarche générale et les travaux de recherche qui ont été nécessaires pour aboutir à un tel composite.

Le chapitre 2 est consacré à l'état de l'art des textiles intelligents, du principe photovoltaïque ainsi que des différentes technologies photovoltaïques, des matériaux composites et des structures souples photovoltaïques. Les différentes technologies de cellules existantes sont exposées avec leurs avantages et inconvénients. Les perspectives en termes de technologies émergeantes sont aussi présentées.
Le textile photovoltaïque étant un composite intelligent utilisant la technologie photovoltaïque, les différents termes seront définis et les applications se rapprochant de ce type de dispositifs recensés.
Chacune des applications est décrite pour faire apparaitre les verrous scientifiques rencontrés lors de l'intégration et le fonctionnement au quotidien des stores.
Ainsi, à la fin de ce chapitre, nous pourrons justifier le choix technologique, ainsi que les évolutions possibles du composite tissu – cellule photovoltaïque.

La mise en œuvre et ma contribution scientifique relative à l'élaboration du produit sont décrites dans le chapitre 3.
Pour minimiser les sources de pannes et pertes énergétiques et aussi avoir un produit durable dans le temps, il est préférable d'étudier sérieusement la connectique ainsi que le comportement physique et électrique du produit. Ce chapitre dédié à ces problématiques relate les difficultés et les solutions étudiées lors de la conception et l'élaboration des prototypes successifs.

Le chapitre 4 traite du développement du procédé de lamination élaboré dans le cadre de cette thèse de doctorat, processus permettant l'intégration de cellules photovoltaïques souples à la structure textile. La première partie de ce chapitre est consacrée à la description des méthodes existantes pour les panneaux souples et rigides. La lamination influe sur les paramètres tels que : le bon fonctionnement, l'efficacité énergétique et la durée de vie du composite.
Au cours des travaux réalisés, plusieurs technologies ont pu être étudiées : lamination sous vide, lamination sur une calandre et lamination sur une calandre à tapis.
La variation des différents paramètres a permis d'optimiser la lamination sur la calandre a tapis qui semble être la plus adaptée à nos besoins. Finalement, une analyse approfondie des résultats obtenus présentée dans cette section a pour but de valider notre technologie et de révéler différents points d'améliorations possibles.

Enfin, la dernière partie de ce chapitre est consacrée aux certifications. Pour l'application store résidentiel, dont la production électrique doit être revendue à l'entreprise de distribution électrique, il est impératif que le système soit certifié IEC 61646 [26] et EN 61730 [27]. Ces normes sont des normes de qualités permettant de garantir la tenue dans le temps pour un crédit d'impôt s'étendant sur 20 ans.

Le chapitre 5 relate les performances électriques et physiques de nos composites textiles – cellules photovoltaïques souples. Il est divisé en deux sections. La première partie relate l'étude du comportement physique électrique d'un store intégrant le complexe photovoltaïque. Dans la seconde partie, les aspects électriques et énergétiques sont étudiés et comparés par rapport aux cellules photovoltaïques classiques rigides disponibles sur le marché.

II. Etat de l'art

II.1. *Textiles intelligents*

II.1.A. Définitions

Les textiles intelligents sont des textiles intégrant des capteurs, des actionneurs et des dispositifs de décision. Ces textiles réagissent avec l'environnement de façon mécanique, thermique, chimique, électronique ou encore magnétique de manière contrôlée. Par exemple, en cas de baisse de température environnementale le tissu de sous vêtement devient chaud.

Ces nouveaux matériaux permettent d'avoir des fonctionnalités susceptibles d'être utilisées dans de nombreux domaines tels que les vêtements de protection individuels, le secteur du transport, le bâtiment, les sports et loisirs, le domaine médical, les géotextiles…

Les textiles intelligents sont répartis selon 3 catégories :

- Les textiles dits intelligents passifs : ces textiles constituent la première génération de textiles intelligents, ils détectent les conditions environnementales (exemple : les nanotubes de carbone)

- Les textiles dits intelligents actifs : ces textiles détectent et réagissent aux conditions ambiantes (exemple : utilisation d'un matériau à mémoire de forme)

- Les textiles intelligents de deuxième génération : en plus de détecter et de réagir aux conditions ambiantes, ils s'adaptent à ces mêmes conditions en fonctionnant avec une base de données décisionnelle et des éléments d'intelligence artificielle (exemple : la RFID)

Pour obtenir les propriétés des textiles permettant des interactions avec l'environnement, il faut assembler des fonctionnalités et des technologies de secteurs différents. Plusieurs types de composants peuvent être ajoutés :

- Composants électroniques
  - Capteurs pour détecter une action ou un état et transmettre un ordre. Ces capteurs peuvent être intégrés dans le fil afin d'améliorer le confort au porté [3] ou encore intégrés dans le tissu [4]

  - Ecrans ou système lumineux pour communiquer des informations [5]

- Composants chimiques
  - Capteurs polymères flexibles qui permettent de faire des mesures de contraintes [6]

II.1.B. Textiles et énergie électrique

Afin de pouvoir utiliser ces nouvelles technologies consommatrices de l'énergie, il est important d'intégrer l'alimentation électrique directement au textile. De plus, le textile peut, en raison de sa souplesse, sa finesse, sa légèreté et son utilisation dans la vie quotidienne, être un très bon support pour stocker ou produire de l'énergie électrique.

L'énergie peut être stockée grâce à des accumulateurs électriques souples similaires à ceux réalisés par impression sur papier ou polymères [7].

Cette énergie peut être produite par transformation à partir d'une autre source énergétique, tel le mouvement d'un textile pour la transformer en énergie électrique. Ceci est possible grâce aux systèmes piézo-électriques découverts par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880. Ces systèmes reposent sur la propriété de certains matériaux anisotropes : soumis à des contraintes mécaniques, une différence de potentiel électrique est engendrée à leurs bornes. Ce phénomène est réversible, c'est-à-dire qu'une tension électrique appliquée aux bornes provoque une déformation du matériau. [8].
Certaines architectures textiles telles que les tissus et les tricots possèdent une capacité de déformation et de mouvement important dans l'espace. Grâce à leurs configurations elles constituent des structures adaptées à l'introduction de matériaux piézoélectriques qui permettent la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Ainsi, on peut récupérer l'énergie mécanique d'un vêtement au porté ou encore d'un tissu exposé au vent comme celui réalisé par François Guillot (Georgia Institute of Technology) : les fibres piézo-électriques sont d'abord enduites afin de les rendre flexibles puis tissées. [9]

Une autre possibilité relative à la production d'énergie électrique consiste à utiliser les cellules photovoltaïques pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Cette technique de conversion est étudiée de manière détaillée au paragraphe …

II.1.C. Connectique

L'énergie produite par le textile doit pouvoir être utilisée soit pour charger une batterie soit directement pour alimenter un appareil électronique. Il est important que l'énergie électrique produite au sein des structures textiles soit disponible à l'utilisation. Cela signifie que ces mêmes structures textiles doivent être capables de conduire l'électricité produite et de rendre l'accès possible à cette énergie par les connecteurs compatibles avec les dispositifs électriques (souples ou rigides). L'interface entre le textile et les câbles doit engendrer le moins de pertes possibles. Christine Kallmayer, Torsten Linz, Rolf Aschenbrenner et Herbert Reichl utilisent des boutons pressions correspondant à une solution amovible [10]. La connexion est faite en positionnant la partie femelle du bouton sur le textile et en la soudant aux fils conducteurs. La partie mâle est soudée aux câbles alimentant la partie électronique. En couplant plusieurs boutons de la même manière, il est possible de limiter les pertes. La résistance d'une telle connexion est d'environ 0,4 Ω.

La connexion peut aussi être réalisée de façon permanente par soudure. Il faudra cependant éviter d'exercer des contraintes mécaniques (différence entre la souplesse de textiles et la rigidité de la soudure).

II.2. *Cellules Photovoltaïques*

II.2.A. Définition

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. [8].
Les cellules photovoltaïques sont des matériaux à base de semi-conducteurs qui, une fois soumis à un rayonnement lumineux, produisent à leurs bornes une différence de potentiel.
L'effet photovoltaïque est fondé sur le principe de l'interaction des ondes électromagnétiques avec les semi-conducteurs. Il est présenté dans la section suivante.

II.2.B. Effet photovoltaïque

II.2.B.a Semi-conducteurs

Différentes familles de semi-conducteurs peuvent être recensées :

- éléments simples
- composés minéraux binaires
- composés organiques

Bien que les semi-conducteurs aient une structure périodique composée d'atomes individuels liés entre eux de façon régulière, ils peuvent être trouvés dans différents états :

- cristallisés
- amorphes
- liquides

L'état amorphe ou liquide est dû à l'existence de groupes ordonnés d'atomes voisins dont la structure est cristalline.

Une cellule photovoltaïque est composée de matériaux semi-conducteurs qui ont la propriété d'avoir, à température nulle (273 K), une structure électronique constituée d'une bande de conduction vide et d'une bande de valence totalement séparée par une bande interdite de faible largeur. Cette bande interdite est de l'ordre de 1 eV pour le semi-conducteur. (Pour le silicium cristallin elle est égale à 1.12 eV et pour le silicium amorphe 1.8 eV).
Les matériaux isolants ont une largeur de bande interdite supérieure (celle-ci est de l'ordre de 5 eV). Les métaux possèdent une bande de conduction et une bande de valence qui se chevauchent (Figure 1) [8].

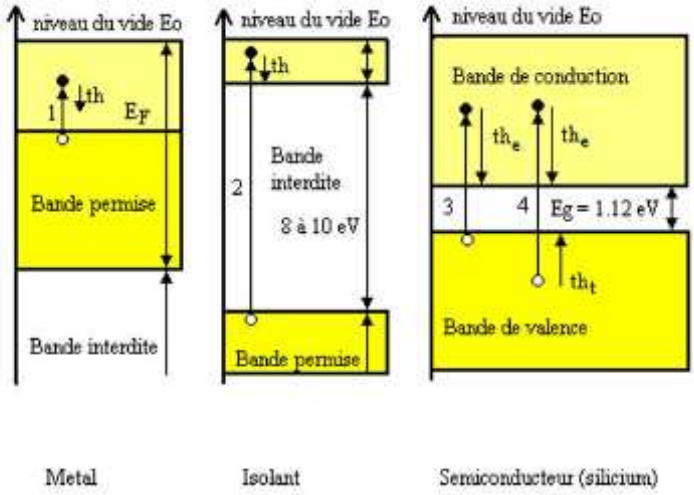


Figure 1 : *Bandes d'énergies des métaux, des matériaux isolants, et des semi-conducteurs [11]*

On définit l'énergie de gap ou interdite E_G comme la différence entre l'énergie de conduction E_C (limite inférieure de la bande de conduction) et l'énergie de valence E_V (limite supérieure de la bande de valence).

$$E_G = E_C - E_V$$

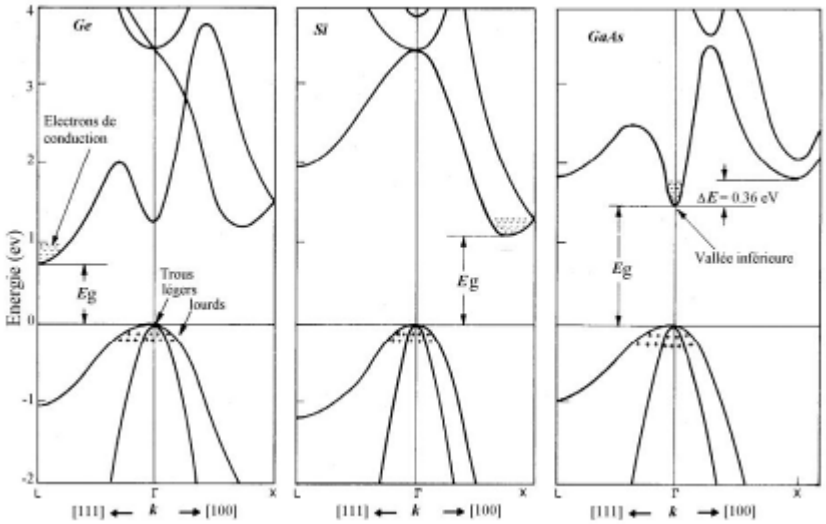


Figure 2 : *Représentation des bandes d'énergie des différents semi-conducteurs [11]*

La Figure 2, qui représente les gaps de différents semi-conducteurs (Germanium, Silicium et Arsenium Gallium), montre que le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence peuvent ne pas se trouver dans la même région de l'espace (k) : on parle alors de gap indirect. Les positions relatives des minimums et des maximums des bandes de valence et de conduction sont dépendantes de la nature du semi-conducteur (Figure 2).

II.2.B.b Conversion photons électrons

Un photon d'énergie E_{Ph} libère un électron de la bande de valence et lui fournit son énergie si elle est supérieure ou égale à l'énergie de gap E_G. Cet électron sera donc libre de conduction et laissera une place vide appelée « trou » dans la bande de valence. L'excèdent d'énergie des photons dont l'énergie est supérieure à celle de la bande interdite n'est pas utilisée, elle est thermalisée : transformée en chaleur.

Un photocourant électrique pourra être créé à partir de cette paire d'électrons trous qui a une durée de vie de l'ordre d'une pico seconde, moment de la recombinaison avec un autre électron.

Pour créer des niveaux d'énergies supplémentaires et permettre ainsi de contrôler la dissociation des électrons (éviter la recombinaison), il est utile de créer un champ électrique en dopant le semi-conducteur. Ce dopage consiste à ajouter des impuretés dans la structure cristalline du matériau.
Pour une cellule silicium, on parle alors de jonction pn. Pour une cellule silicium amorphe, la jonction est de type p-i-n ou n-i-p. La couche i étant une couche non-dopée qui permet la collecte des porteurs de charges par le champ électrique.

Le dopage de type p est réalisé par l'ajout d'accepteurs : matériaux comportant des atomes dont le nombre de valence est inférieur à celui du semi-conducteur ainsi substitué. A l'inverse, en remplaçant des atomes par un matériau comportant un nombre d'électrons de valences supérieur, un dopage de type n est obtenu. Le matériau est dit donneur.

Les électrons dans la zone n sont appelés porteurs majoritaires et les trous, porteurs minoritaires. Par réciprocité, les porteurs majoritaires dans la zone p sont les trous et les minoritaires, les électrons.

Pour un semi-conducteur silicium, le dopage de type p et n se fait respectivement avec des éléments de la colonne III (13) et V (15) du tableau de Mendeleïev.

Des régions vont ainsi être créées. Pour une cellule silicium cristallin, celles-ci sont les suivantes :

- base : région de type p
- RCE : région de charge d'espace (région isolante à champ électrique important orienté de l'émetteur vers la base)
- émetteur : région de type n

La zone de charge d'espace est une zone frontière entre l'émetteur et la base. Elle est due aux porteurs majoritaires qui tentent de passer dans la zone où ils sont minoritaires. Contrairement aux régions n et p, il n'y a pas de neutralité électrique dans cette zone. Les charges fixes n'étant pas compensées par le dopage, une charge positive s'établit du coté n et une charge négative du coté p [12]

L'accumulation d'excès d'électrons dans l'émetteur et de trous dans la base polarisent la jonction en direct. Ainsi, la valeur du potentiel de diffusion est diminuée.

Ceci permet au photocourant de circuler dans un circuit extérieur et génère une phototension.

Lorsque l'équilibre est rompu par l'interaction d'un photon dont l'énergie est supérieure à celle du gap, dans la zone p ou n, une paire électron-trou est créée. Celle-ci est alors séparée par le champ électrique de la région de déplétion [12].

Le photocourant généré est proportionnel à l'intensité lumineuse. Il résulte de la somme de 2 photocourants : photocourant de génération et photocourant de diffusion.
Le premier est dû à la séparation des porteurs de charges par le champ électrique de la zone de charge d'espace.
Le second est généré par les porteurs de charges majoritaires qui tentent de pénétrer dans la zone où ils sont minoritaires.

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque peut ainsi être schématisé suivant la Figure 3:

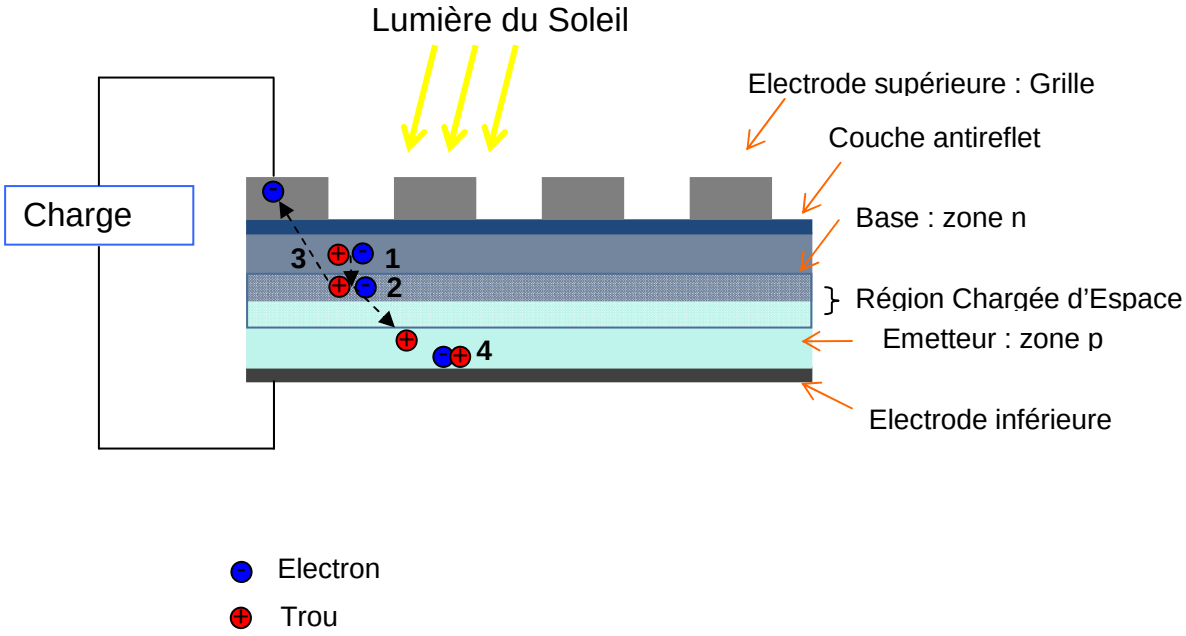


Figure 3 : *Fonctionnement des cellules photovoltaïques*

1. Génération paire électron-trou ;
2. Diffusion de cette paire vers la zone de charge d'espace ;
3. Séparation Electron-Trou ;
4. Expulsion du porteur de charge minoritaire vers la zone où il est majoritaire (ici le trou vers la zone p) ;
5. Après être passé par la charge, l'électron et le trou se recombinent.

II.2.B.c Schémas équivalents et comportements électriques

Idéalement, une cellule photovoltaïque peut être modélisée comme une source de courant idéale jusqu'à une certaine tension limite ou comme une source de tension idéale jusqu'à un courant limite [11].

II.2.B.d Cellule photovoltaïque idéale

Dans l'obscurité, une cellule photovoltaïque se comporte comme une diode.
Soumise à un éclairement, sa caractéristique est obtenue par soustraction. Le courant de la cellule serait égal au courant de court circuit moins celui de la diode en polarisation directe. La tension V_D de la diode est alors inférieure à 0. Ainsi le courant fournit par la cellule répondrait à la loi suivante :

$$I_{Cell} = I_{cc} - I_D$$

$$I_{Cell} = I_{CC} - I_{Sat}\left[\exp\left(\frac{qV_D}{\eta kT}\right) - 1\right] \qquad \text{Équation 1}$$

Avec :

I_D : courant traversant la diode (A)
I_{CC} : courant de court circuit (A)
I_{Sat} : courant de Saturation (A)
q : charge élémentaire (C)
V_D : tension aux bornes de la diode (V)
k : constante de Boltzmann
T : température absolue de la diode (°K).
η : facteur d'idéalité de la diode

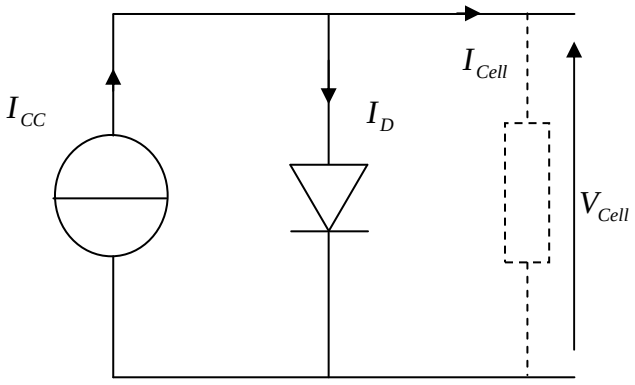


Figure 4 : *Modélisation simple d'une cellule photovoltaïque*

Pour une faible radiation, on peut donc schématiser une cellule photovoltaïque silicium cristallin idéale avec un générateur de courant I_{CC} imparfait en parallèle avec une diode [13]. Ce modèle est dit de diode simple.

Les pertes dues à la résistivité des électrodes et du courant de fuite des différentes couches de la jonction pn sont respectivement modélisées par la résistance de série R_s et la résistance de shunt R_{Sh}. (Figure 5)

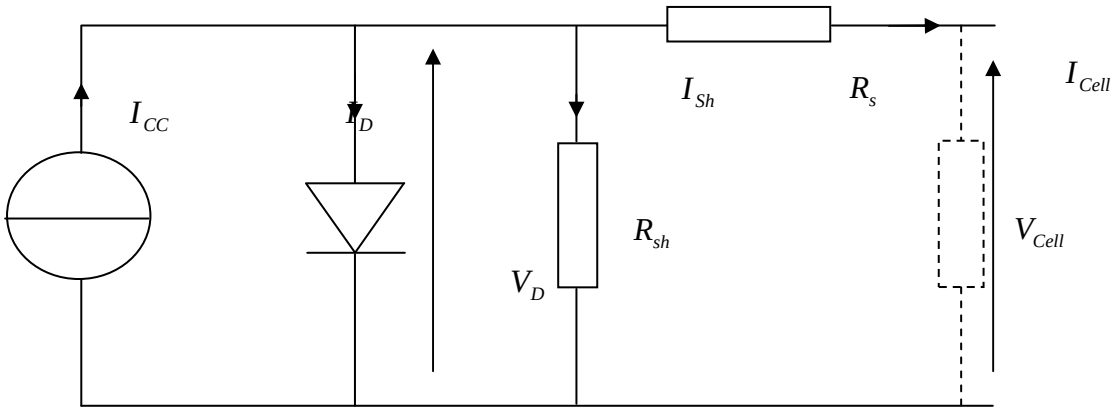


Figure 5 : *Modélisation d'une cellule photovoltaïque et de ses pertes*

Le courant I_{Cell} peut être déterminé ainsi :

$$I_{Cell} = I_{CC} - I_D - I_{Sh}$$

$$I_{Cell} = I_{CC} - I_{Sat}\left[\exp\left(\frac{q\left(V_{Cell} + R_s I_{Cell}\right)}{\eta kT}\right) - 1\right] - \frac{V_{Cell} + R_s I_{Cell}}{R_p} \qquad \textbf{Équation 2}$$

Avec :

I_D : courant traversant la diode (A)
I_{Sat} : courant de Saturation (A)
q : charge élémentaire (C)
V_{Cell} : tension aux bornes de la cellule (V)
k : constante de Boltzmann
T : température absolue de la diode (°K)
η : facteur d'idéalité de la diode

Le modèle de double diode est choisi pour représenter une cellule photovoltaïque sous une radiation forte. Ainsi, on peut exprimer le courant d'obscurité ou de diode (deuxième terme de l'équation) comme la somme d'un courant de diffusion et de recombinaison respectivement représentés par les courants de saturation Sat_1 et Sat_2 sur le schéma équivalent de la Figure 6.

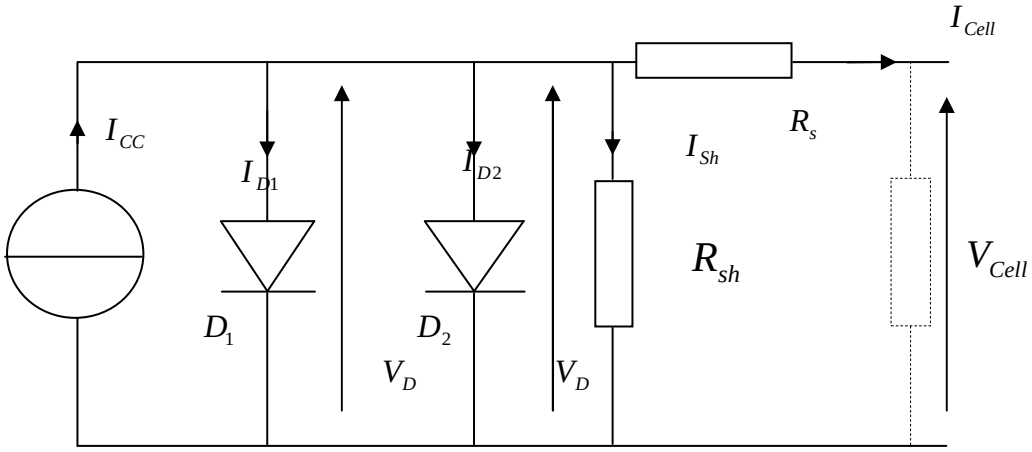


Figure 6 : *Modélisation double diode d'une cellule photovoltaïque*

$$I_{Cell} = I_{CC} - I_{D1} - I_{D2} - I_p$$

L'équation du courant produit par la cellule peut être mise sous la forme suivante :

$$I_{Cell} = I_{CC} - I_{Sat1}\left[\exp\left(\frac{q(V_{Cell} + R_s I_{Cell})}{\eta_1 kT}\right) - 1\right] - I_{Sat2}\left[\exp\left(\frac{q(V_{Cell} + R_s I_{Cell})}{\eta_2 kT}\right) - 1\right] - \frac{V_{Cell} + R_s I_{Cell}}{R_{Sh}}$$

Avec :

I_{Sh} : courant de Shunt (A)
I_D : courant traversant la diode (A)
I_{Sat1} : courant de saturation (A)
I_{Sat2} : courant de saturation (A)
V_{Cell} : tension aux bornes de la cellule (V)
k : constante de Boltzmann.
q : charge élémentaire (C)
T : température absolue de la diode (°K)
η_1 : facteur d'idéalité de la diode du courant de diffusion
η_2 : facteur d'idéalité de la diode du courant de recombinaison

Le courant généré par une cellule photovoltaïque dépend donc directement de l'éclairement auquel on la soumet [11].

II.2.B.e Grandeurs électriques et caractérisations d'une cellule photovoltaïque

Les modèles définis permettent de tracer la caractéristique I=f(V). Celle-ci permet de trouver le point de fonctionnement de la cellule défini par la charge résistive.
Une cellule photovoltaïque n'impose pas de tension ni de courant de fonctionnement et ce, quelle que soit la valeur de l'éclairement.

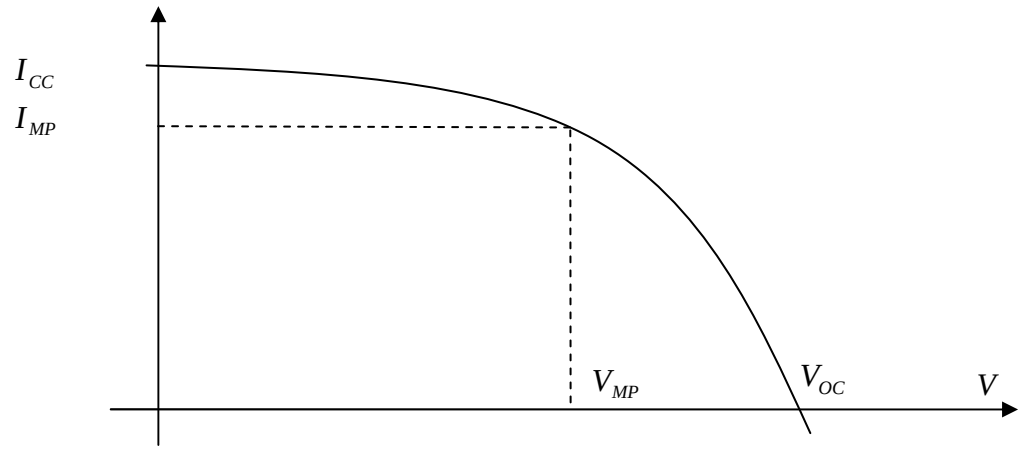


Figure 7 : *Caractéristique cellule*

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par sa tension de circuit ouvert (V_{OC}) et intensité de court-circuit I_{CC}. Ces deux paramètres correspondent respectivement à la tension pour laquelle aucune charge n'est placée entre les bornes de la cellule, donc pour un courant dont la valeur est nulle, et au courant maximal proportionnel à l'irradiance lors d'un court circuit.

Un autre point remarquable est le point dit de puissance crête soit (P_c) ou P_m pour puissance maximale exprimée en W_c : c'est le point pour lequel le courant et la tension sont maximums.
Il est défini avec les conditions standards de tests (STC : Standard Test Conditions) correspondant aux conditions de mesures suivantes :

- Irradiance 1000 W/m² (AM1.5 G : cf II.2.C.a Figure 11)
- Température 25℃

La tension et l'intensité correspondant à cette puissance sont appelées Vmp et Imp.

Le facteur de forme de la cellule ou FF est le rapport de la puissance crête sur la puissance idéale de la cellule c'est-à-dire pour un courant I_{CC} et une tension V_{OC}.

Ce facteur de forme inclut donc les pertes de résistance, les pertes shunt et le facteur d'idéalité de la diode.

Il peut être mis sous la forme :

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{cc}}$$

Selon les technologies de cellules, la température a une influence plus ou moins importante sur le comportement électrique de la cellule.
Si la température augmente à proximité de celle-ci, la bande interdite diminue ce qui entraine une légère augmentation de courant. Cependant, la tension de circuit ouvert en est fortement diminuée. Un coefficient de température (k) est alors donné, il représente le pourcentage de gain (lorsqu'il est positif) par degré de température (%/°K). Pour le courant, le coefficient k_i est positif et pour la tension, le coefficient k_v est négatif.
De plus, une valeur de température d'utilisation est donnée pour une cellule encapsulée : NOCT (Normal Operation Cell Temperature) ou TUC (Température d'Utilisation Cellule). Celle-ci caractérise la puissance que peut délivrer une cellule dans les conditions suivantes :

- inclinaison à 45°
- valeur d'irradiance de 800 W/m² pour un spectre solaire AM1.5
- connectée à une charge nominale
- faces libres exposées à une circulation d'air de vitesse 1 m/s
- température ambiante de 20 °C

II.2.B.f De la cellule au module

Un module photovoltaïque est obtenu par association de cellules photovoltaïques. Les cellules assemblées seront dans un deuxième temps encapsulées pour les protéger des agressions extérieures. Toutes les grandeurs précédemment décrites sont vérifiées pour une association de cellules, elles caractériseront le module.

L'association en série de cellules de même intensité permet d'additionner les tensions de chacune tandis que l'association en parallèle permet d'additionner les courants des cellules de même tension. Lors de la fabrication des modules, il faut donc trier les cellules pour que celles-ci aient la même intensité donc un rendement assez proche.

La tension d'utilisation est atteinte par association de cellules en série. Ceci augmente la résistance de série du module et ainsi ses pertes.

Tout comme une cellule, un module photovoltaïque est caractérisé par sa tension de circuit ouvert (Voc) ainsi que par son courant de court circuit (Icc). Lors d'une connexion en parallèle, la courbe caractéristique peut-être obtenue en multipliant pour chaque valeur de tension, la valeur d'intensité de cellule correspondante par le nombre de cellules. De même, pour un branchement série les nouvelles valeurs de tension sont obtenues en multipliant, pour chacune des valeurs d'intensité, la valeur de tension correspondante par le nombre de cellules connectées.

Comme pour une cellule, la tension de circuit ouvert correspond à la tension maximale sous un éclairement de 1000 W/m² que peut fournir un panneau lorsque son intensité est nulle. De la même manière, l'intensité de court circuit représente l'intensité maximum que le panneau peut fournir pour une tension nulle.

II.2.B.g Protection des cellules

Lors du montage du module, il faut prévoir la protection des cellules pour que celles-ci ne soient pas dégradées lors de l'utilisation.
Il est nécessaire de protéger les cellules pour des branchements séries et pour des branchements parallèles.

II.2.B.g.i Branchement série

Lorsque n cellules de tension V_1 sont connectées en série, la tension totale de l'installation est : $V_{Tot} = n \cdot V_1$.

Si l'une de ces cellules est occultée, la valeur de sa tension V_2 est alors inférieure à V_1 et la totalité de l'installation a une tension $V_{Tot} = (n-1) \cdot V_1 + V_2$.
On a $V_2 = V_{Tot} - (n-1) \cdot V_1$.

Pour une impédance inférieure à une certaine valeur Z, $V_{Tot} \leq -(n-1) \cdot V_1$ donc $V_2 \leq 0$ et $I_2 \geq 0$. La cellule occultée fonctionne alors en récepteur polarisé direct.

Dans le cas extrême, $V_{Tot} = 0$ d'où $V_2 = -(n-1) \cdot V_1$.
Le point A représente la valeur de tension des cellules éclairées. Son image est la tension de la cellule occultée soit $-(n-1) \cdot V_A$. Elle peut être très grande en valeur absolue si la résistance de shunt est très importante (infinie dans le cas d'une cellule idéale)

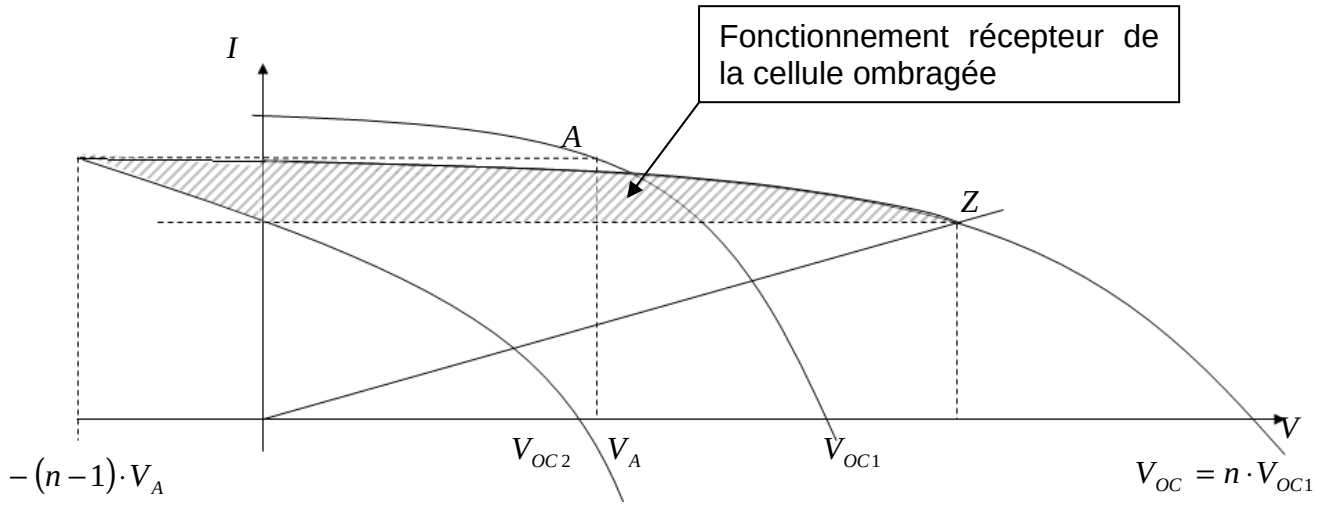


Figure 8 : *Caractéristiques IV de n cellules connectées en série*

Pour éviter qu'un tel phénomène se produise, il est conseillé de connecter en parallèle avec chaque cellule une diode « By Pass ». Sa tension de polarisation doit être égale à l'inverse de la tension nominale de l'ensemble des cellules, soit $n \cdot V_1$ [11].
Ainsi, en cas de déséquilibre, la diode polarisée par la tension inverse du module permet de court-circuiter la cellule occultée [11].

En pratique, il n'est pas nécessaire de mettre une diode par cellule. Généralement, pour les panneaux cristallins, une diode est utilisée pour 18 cellules connectées en série.

II.2.B.g.ii Branchement parallèle

Dans le cas où n cellules d'intensité I_1 sont connectées en parallèle, l'intensité totale de l'installation est : $I_{Tot} = n \cdot I_1$.
Si l'une de ces cellules est occultée, la valeur du courant I_2 est alors inférieure à I_1 et la totalité de l'installation a une tension $I_{Tot} = (n-1) \cdot I_1 + I_2$.
On a $I_2 = I_{Tot} - (n-1) \cdot I_1$.

Pour une impédance inférieure à une certaine valeur Z, $I_{Tot} \leq -(n-1) \cdot I_1$ donc $I_2 \leq 0$ et $V_2 \geq 0$. La cellule occultée fonctionne en récepteur de polarisation indirect.

Dans le cas extrême, $I_{Tot} = 0$ d'où $I_2 = -(n-1) \cdot I_1$.
Le point A représente la valeur de courant des cellules éclairées. Son image est le courant de la cellule occultée soit $-(n-1) \cdot I_A$. Il peut-être très grand en valeur absolue si la résistance de série est proche de zéro (nulle dans le cas d'une cellule idéale).

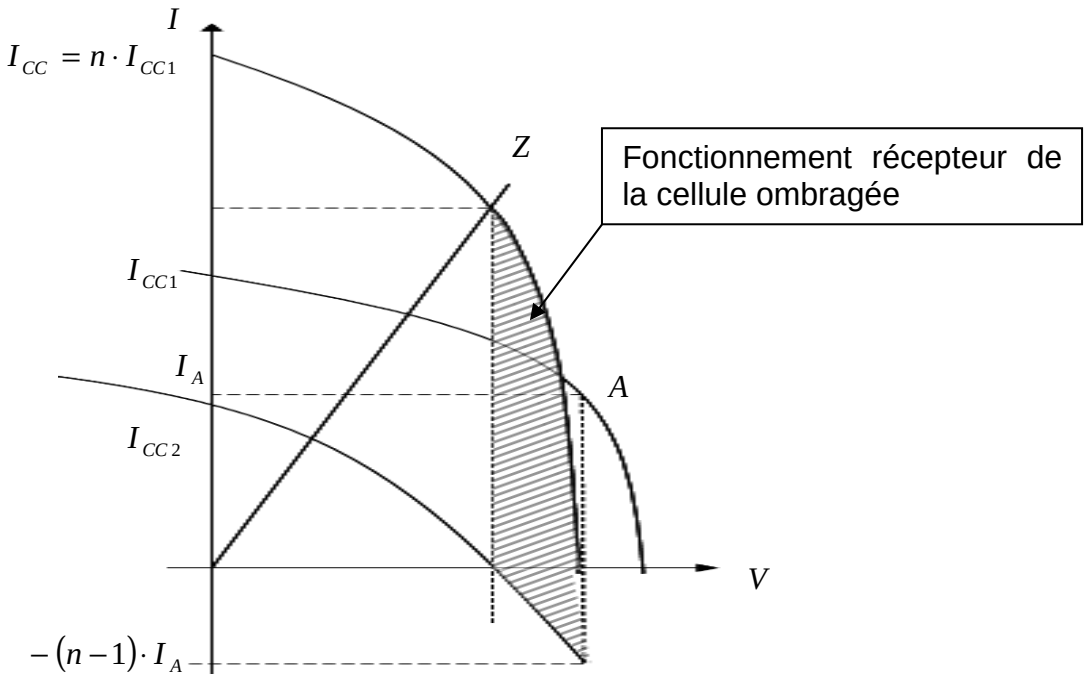


Figure 9 : *Caractéristiques IV de n cellules connectées en parallèle*

Une diode mise en série entre deux branches de cellules mises en parallèle permet de protéger la cellule occultée du reste des groupes de cellules [11].

II.2.C. Répartition géographique de l'ensoleillement

II.2.C.a Rayonnement solaire

II.2.C.a.i Le Soleil

Le Soleil est une étoile de 696 000 km de rayon éloignée de 150 millions de kilomètres de la Terre [13].
C'est une source d'énergie de luminosité qui avoisine 3.85×10^{26} W. Le spectre solaire s'étend de 320 nm à 2500 nm [13]. (Figure 10)

II.2.C.a.ii Le rayonnement solaire

On appelle rayonnement ou irradiance l'énergie reçue par une unité de surface. Le rayonnement global solaire orienté arbitrairement au travers d'un ciel clair sur une surface a 3 composantes :

- rayonnement direct
- rayonnement diffus
- albedo

Sur une surface horizontale, l'albédo est nul et le rayonnement direct est la composante la plus élevée.

La puissance solaire qui atteint la Terre (hors atmosphère) est d'environ 1.74 × 1017 W [13] ce qui correspond à une puissance de 1367 W/m² [13]. Cette constante est appelée constante solaire. [8]. Cependant, l'énergie reçue par la surface de la Terre est diminuée par la traversée de l'atmosphère.
En effet, celle-ci est absorbée par les molécules qui composent l'atmosphère (Figure 10) ainsi que par les poussières et les aérosols [13].

II.2.C.a.iii Le spectre solaire

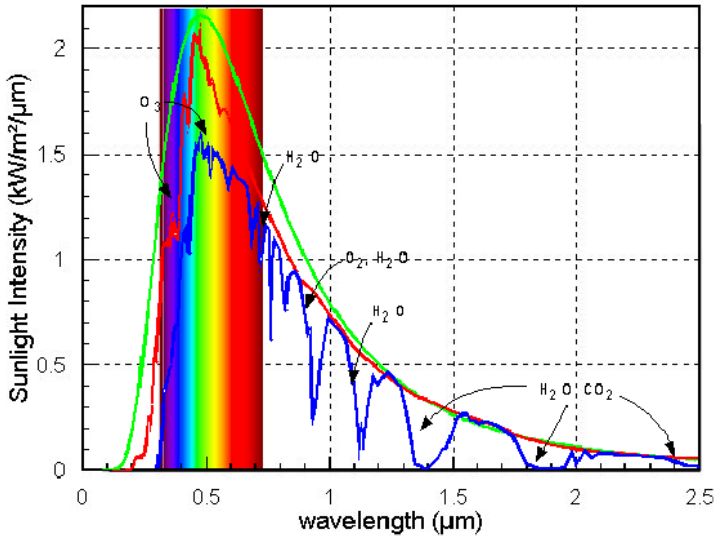


Figure 10 : *Intensité lumineuse en fonction de la longueur d'onde.* [13]
En vert, le spectre d'un corps noir de 6000K (Soleil), en rouge le spectre hors atmosphère, en bleu le spectre du soleil après absorption dans l'atmosphère

Pour connaître la quantité d'absorption de la puissance et déterminer ainsi la puissance reçue au sol, un modèle appelé Air Mass (AM) a été établi. Ceci représente la quantité d'air traversée par le rayonnement du Soleil.
En connaissant l'angle incident entre la position du Soleil et son zénith, (Figure 11) l'AM définissant le spectre peut être déterminé ainsi :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)}$$

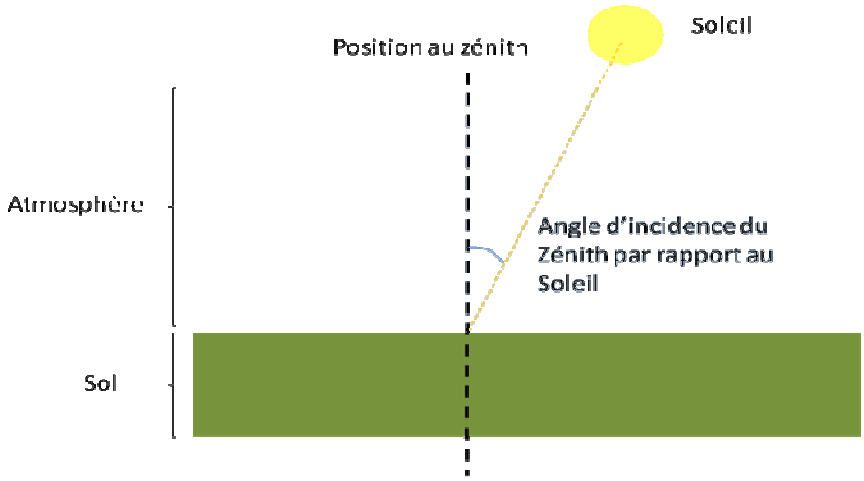


Figure 11 : *Masse d'atmosphère (AM)*

Par convention, AM0 est le rayonnement hors atmosphère.
L'indice de mesure utilisé pour comparer les performances des cellules photovoltaïques est AM 1.5 G. Le G signifie que le rayonnement est Global.

AM1.5 représente une radiation de 970 W/m², usuellement cette valeur est estimée à 1000 W/m² [13].
Cependant, il faut noter que cet indice ne tient pas compte du lieu du calcul (altitude et environnement) ou encore des conditions météorologiques.

De plus, la valeur de la puissance reçue par la Terre est dépendante de la saison. En effet, l'angle d'inclinaison de la Terre entraîne une différence d'angle du rayon incident à la surface de la Terre. Ceci implique qu'au même endroit, la hauteur angulaire et l'azimut sont différents selon la période de l'année. On définit la hauteur angulaire ou hauteur du Soleil par l'angle que fait le Soleil avec le plan horizontal. L'azimut est lui défini par l'angle entre l'observateur et le plan vertical de l'objet observé et le nord géographique et l'observateur. Dans notre exemple, l'objet observé et le Soleil. (Figure 12).

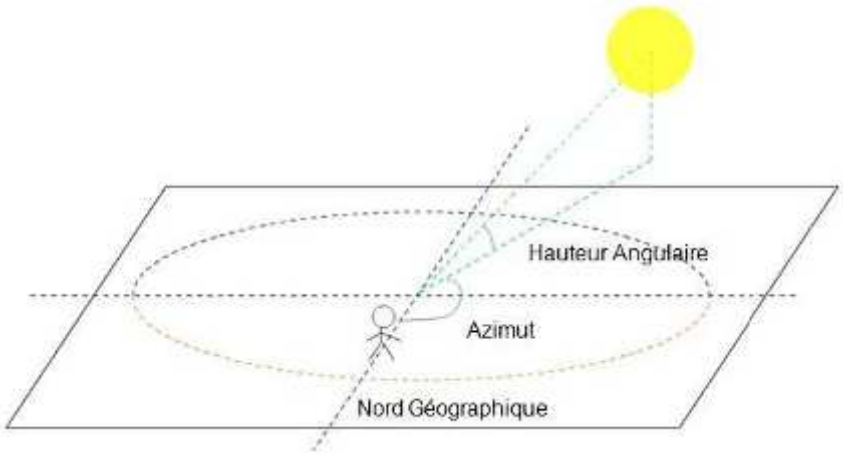


Figure 12 : *Représentation de la hauteur angulaire et de l'azimut*

Lorsqu'une installation est réalisée, il est utile de faire un relevé d'ombre à l'aide d'un masque solaire et pouvoir déterminer ainsi le temps d'exposition de l'installation au cours de l'année. Le masque solaire est un abaque d'ensoleillement à une latitude donné. Il permet de déterminer les périodes d'ombres grâce à la hauteur du soleil (degré) en fonction de l'azimut (degré).

II.2.C.a.iv Répartitions du rayonnement solaire

L'énergie solaire est plus ou moins importante selon les lieux où l'on se trouve sur la planète. Selon la Figure 13, on remarque que les pays du tiers monde bénéficient d'une énergie lumineuse plus importante que les pays développés. Selon la latitude, l'énergie solaire reçue au sol sur Terre varie de 750 à 2550 kWh/m² par an. L'énergie moyenne reçue en France est de 1 100 kWh/m². Cette énergie diminue graduellement en fonction de la latitude. Elle est minimum dans le Nord-Est avec une valeur proche de 1 000 kWh/m² par an et un maximum de 1600 kWh/m² par an dans les régions du Sud de la France. (Figure 14)

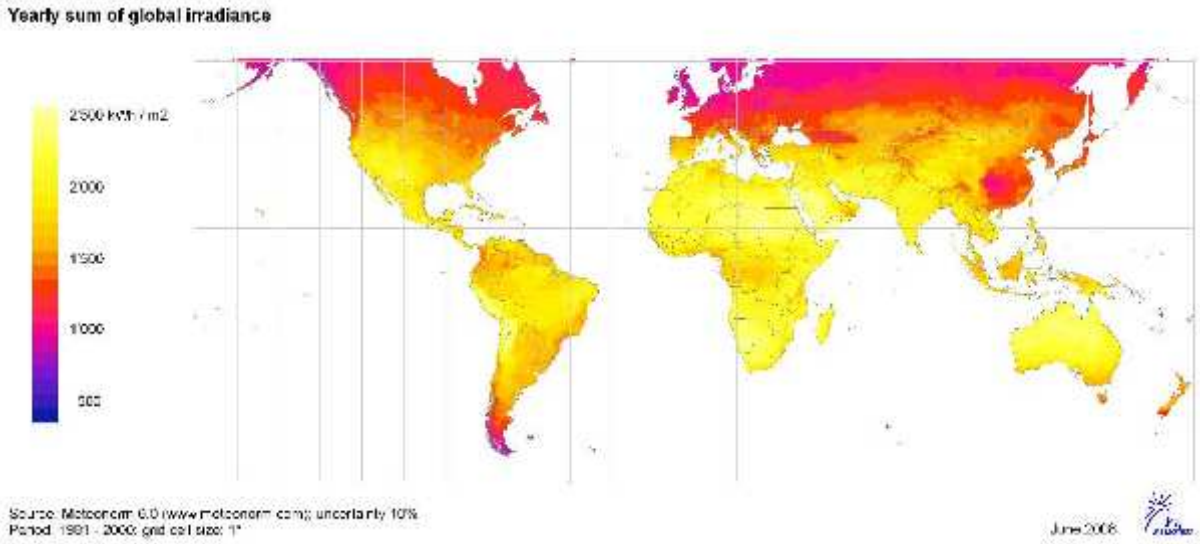


Figure 13 : *Carte mondiale de radiation solaire, plan horizontal* [15]



Figure 14 : *Carte nationale de France de radiation solaire, plan horizontal* [16]

II.2.D. Production

La production mondiale de modules et de cellules photovoltaïques a fortement augmenté ces dernières années. Elle double quasiment en 2008 en passant de 4 GW en 2007 à 7.9 GW en 2008 [18]. La Chine prend la tête devant l'Europe de la production de cellules photovoltaïques en 2008. La production de cellules en France en 2008 s'élève à 60 MW et la production de modules 120 MW [0].
L'entreprise Allemande Q-Cells est celle dont la production de cellules est la plus importante. (Figure 15). En possédant des entreprises telles que Flexcell ou Sunfilm, Q-Cells assure la diversité des technologies.

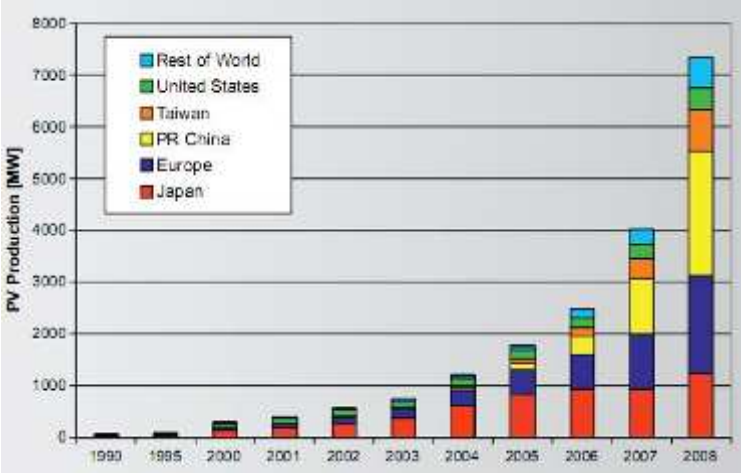


Figure 15 : *Fabrication des cellules et modules* [17]

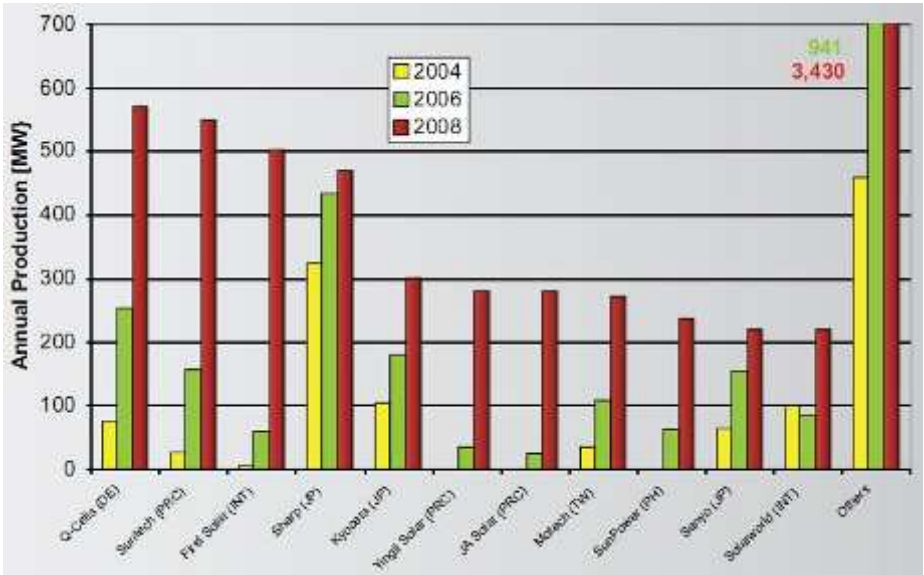


Figure 16 : *Les 10 entreprises productrices photovoltaïques les plus importantes* [17]

II.2.E. Applications

Bien que découverte en 1839, l'énergie photovoltaïque n'est utilisée hors laboratoire que depuis 1958 pour une application spatiale. Les panneaux photovoltaïques ont servi à alimenter une radio du satellite artificiel américain Vanguard. Elles seront par la suite utilisées dans les programmes spatiaux. Cependant, à cause de leur prix élevé, elles ne sont utilisées pour des applications terrestres que depuis 1980. En effet, c'est au second choc pétrolier de 1980 que l'on doit l'intérêt pour cette technologie qui se démarque du pétrole.
Bien que la baisse du prix de l'énergie qui a suivi cet évènement ait ralenti le développement de la technologie photovoltaïque, celle-ci est tout de même utilisée et tend à se démocratiser aujourd'hui. La Figure 17 montre l'évolution de la répartition des installations dans le monde.
En 2009, Photon International Magazine notifie une chute de 97 % du nombre d'installations réalisées par rapport à l'année 2008 en Espagne [18]. L'Allemagne avec près de 3.8 GW devient leader du nombre d'installations en 2009 devant le Japon (0.5 GW) et les Etats-Unis (0.465 GW). La France arrive en huitième position avec 0.191 GW d'installés.

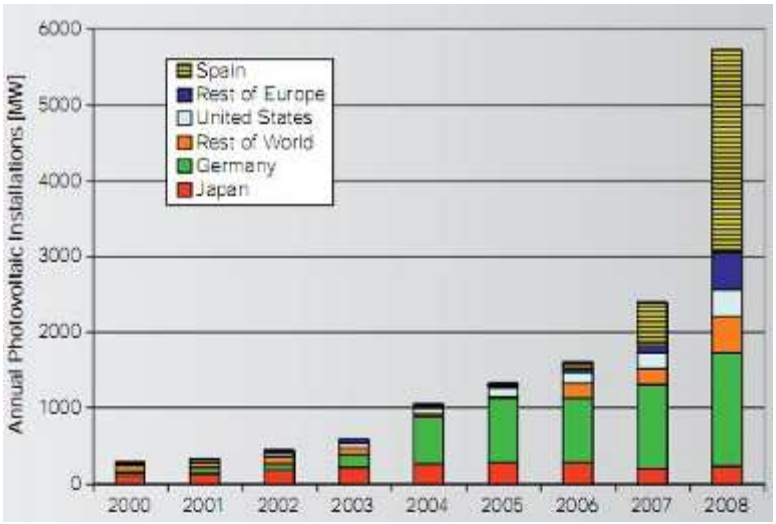


Figure 17 : *Cumul par pays des installations photovoltaïques dans le monde* [17]

Le photovoltaïque est utilisé dans 2 marchés prépondérants :

- spatial
- terrestre

Le marché Terrestre peut se diviser en plusieurs catégories :

- petites applications industrielles (calculatrices…)
- applications militaires
- installations industrielles
    - utilisation direct de l'énergie produite ou site isolé (« Off-Grid »)
    - revente du surplus de production au réseau (« On-Grid »).
    - revente totale au réseau (« On-Grid »).

- installations résidentielles
  - utilisation direct de l'énergie produite ou site isolé (« Off-Grid »)
  - revente du surplus de production au réseau (« On-Grid »).
  - revente totale au réseau (« On-Grid »)
- centrales solaires

La Figure 18 représente l'évolution au cours du temps de la répartition des productions raccordées au réseau (vente surplus et vente totale de l'énergie produite) et les productions en site isolé en France. [19]. La **Figure** 19 représente la répartition du cumul des installations dans les pays suivants : Australie, Autriche, Canada, Suisse, Allemagne, Danemark, Espagne, France, Grande-Bretagne, Israël, Italie, Japon, Corée, Mexique, Malaisie, Pays-Bas, Norvège, Portugal, Suède, Turquie, Etats-Unis d'Amérique.

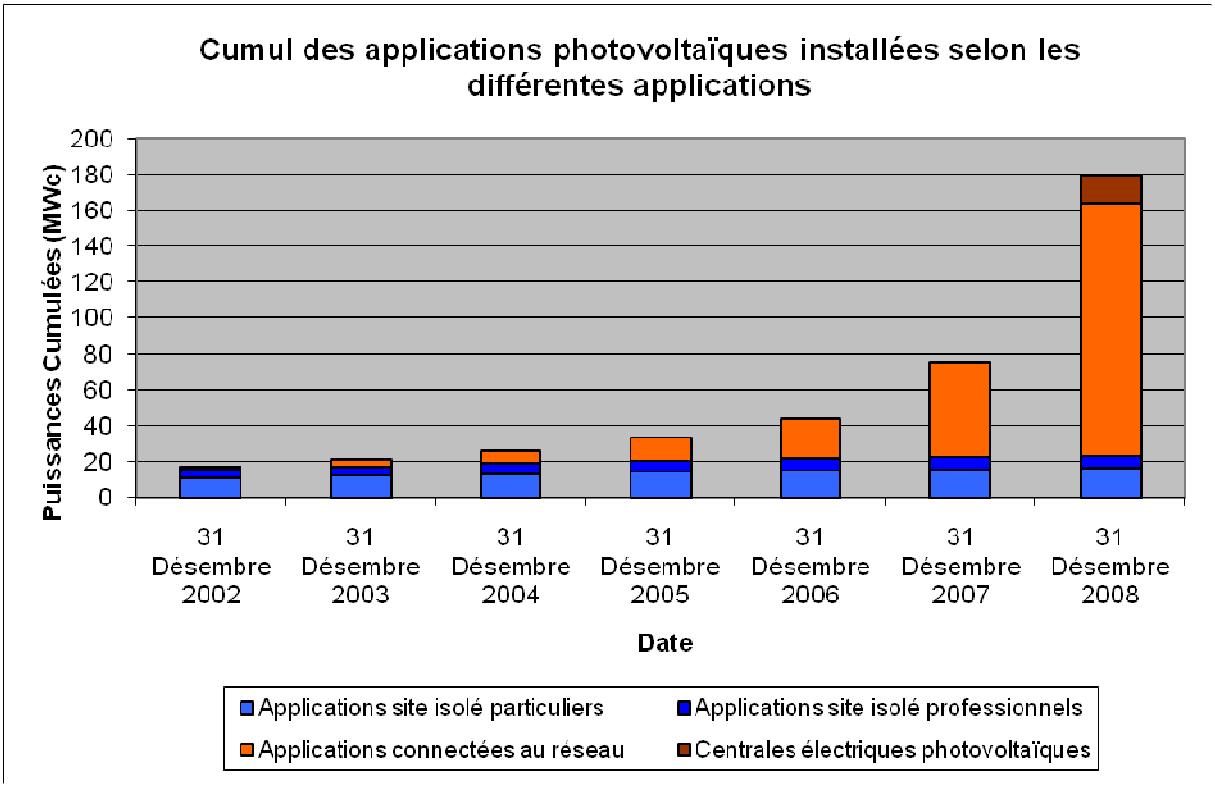


Figure 18 : *Evolution du cumul des applications photovoltaïques installées* [19]

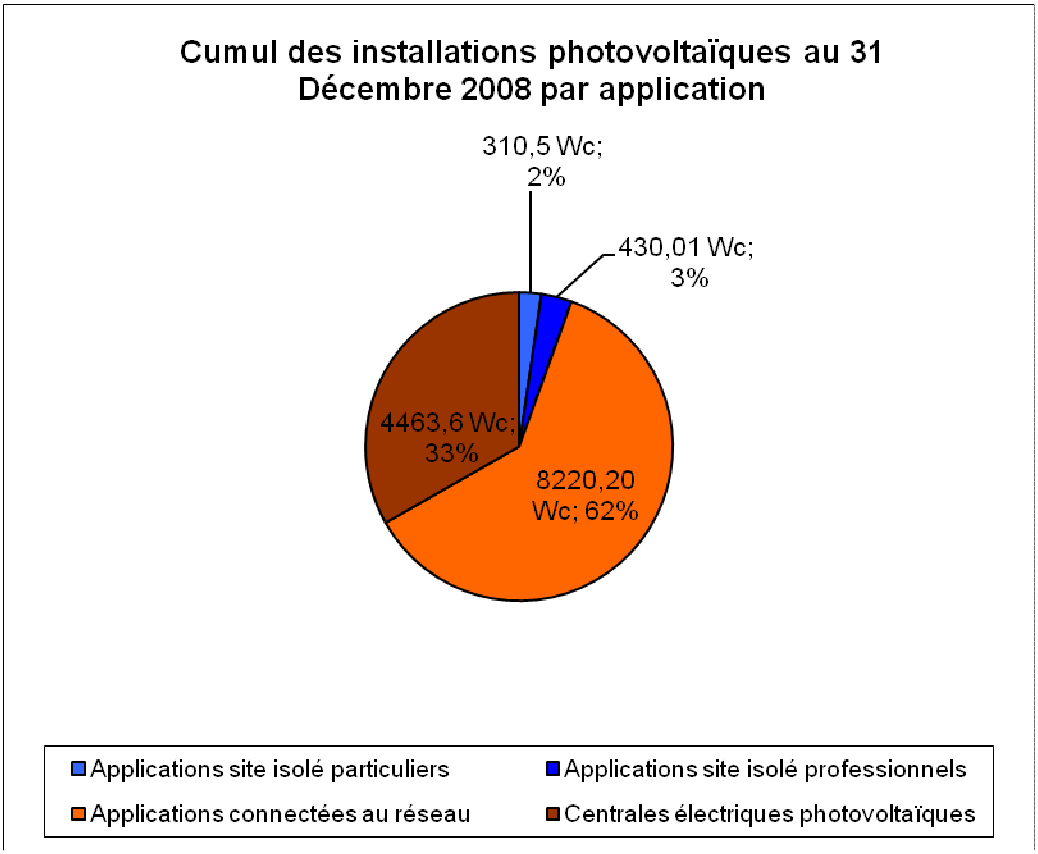


Figure 19 : *Cumul des applications photovoltaïques installées* [19]

II.2.E.a Off-Grid

Ce type d'applications permet une autonomie dans les lieux où il n'est pas possible d'installer une ligne directement reliée au réseau.
On s'aperçoit cependant qu'en France les applications Off-Grid représentent 12.76 % tandis que dans le monde elles ne représentent que 5% de la puissance installée cumulée en 2008.

II.2.E.a.i Applications industrielles

Les panneaux photovoltaïques en sites isolés sont essentiellement utilisés pour des applications de communication dans les transports, de sécurité (signalisation routière et bornes d'appels)…
En 2008, ces applications représentaient 3.2% de la puissance installée cumulée mondiale et 9% en France.

II.2.E.a.ii Applications domestiques

Les applications domestiques sont souvent utilisées dans des lieux qui ne sont pas reliés aux réseaux électriques, souvent des espaces ruraux. En 2008, elles représentaient 2% de la puissance installée cumulée mondiale et 3.7% en France.

II.2.E.a.iii L'installation

Il est important de dimensionner correctement l'installation pour que celle-ci réponde le plus à la contrainte d'autonomie. Deux types d'installation peuvent être envisagés :

- une installation en courant continu
- une installation en courant alternatif

- **Equipement et installation**

La Figure 20 est un exemple d'installation photovoltaïque autonome

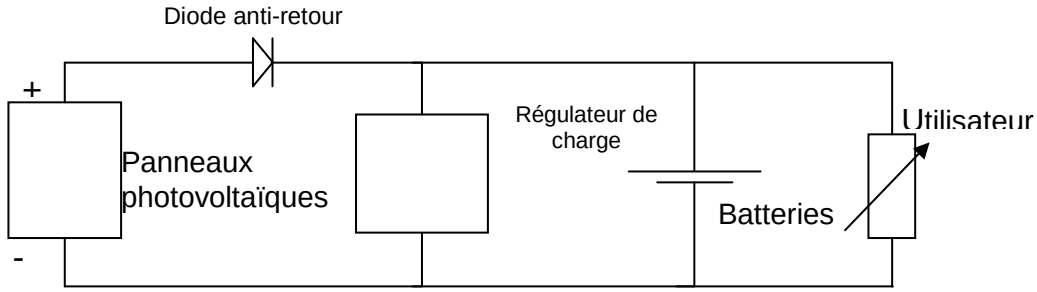


Figure 20 : *Schéma d'installation photovoltaïque application autonome*

1. Les panneaux photovoltaïques

Toutes les technologies de panneaux photovoltaïques peuvent être utilisées. Il faut tenir compte lors du dimensionnement des panneaux de l'orientation et de la surface disponible.
Le point de fonctionnement optimal s'obtient avec les caractéristiques de la batterie et du panneau solaire en fonction de la radiation. On s'aperçoit ainsi que la tension de la batterie utilisée ou des batteries utilisées (6, 12, 24 ,48 V) détermine la tension de chacun des panneaux photovoltaïques et le nombre à mettre en série. Comme la batterie se charge à tension constante, le courant généré par l'installation photovoltaïque détermine le temps de charge de la batterie.

2. La diode anti retour

La diode anti-retour évite qu'à faible luminosité, le panneau photovoltaïque fonctionne en récepteur en polarité indirecte. Une diode placée en série sur l'une des bornes du régulateur de charge permet d'éviter une décharge de la batterie dans les panneaux solaires.

3. Le régulateur de charge

Le régulateur de charge doit maintenir la batterie proche de son état de charge maximal et la protéger ainsi de la décharge profonde. Au cours de la charge, il est

utile de connaître la tension aux bornes de la batterie afin de quantifier quelle capacité d'énergie a stocké l'accumulateur et réguler ainsi la tension de charge.
La régulation peut être faite :

- en adaptant le nombre de cellules photovoltaïques du panneau afin qu'une fois la batterie chargée, la tension de charge soit égale à la tension de circuit ouvert des cellules (autorégulation),
- en parallèle sur l'installation photovoltaïque en dissipant le surplus d'énergie produite en chaleur (régulation Shunt).
- en série en utilisant un disjoncteur qui ouvre le circuit quand la tension de charge indique que la batterie est chargée ou un transistor qui fonctionnera comme une résistance variable et régulera ainsi le courant de charge.

4. Les batteries

Les batteries sont des accumulateurs qui permettent de stocker de l'énergie électrique. Les charges peuvent être sous forme électrochimiques ou électrostatiques. Le courant de charge ainsi conservé peut être restitué lors de la connexion à un récepteur [8].
Il existe différentes technologies d'accumulateurs de types électrochimiques. Le principe de ces accumulateurs est basé sur une réaction d'oxydoréduction. Les batteries au plomb sont généralement préférées aux autres technologies de batterie.

Selon les technologies, les batteries ont un rendement, un nombre de cycles de charge et décharge, un taux d'autodécharge, et une durée de vie plus ou moins élevée.

Chacune d'entres elles peut-être caractérisée par les paramètres suivants :

- Tension d'un élément : U en Volt (V)
- Capacité : C en Ampère-heure $(A \cdot h)$

Cette grandeur permet de connaître pour une durée et des conditions de température définies la quantité d'électricité délivrée par un accumulateur chargé dans un récepteur jusqu'à un certain seuil de tension.

- Capacité Massique : C en Ampère-heure $(W \cdot h / Kg)$

La capacité massique est le rapport énergétique par unité de masse d'une batterie. Cette grandeur peut-être utile dans le cas d'une utilisation pour laquelle le poids est un critère important.

- Rendement $\eta\ (\%)$

Le rendement d'une batterie est le rapport entre la capacité de décharge et la capacité de charge.

- Taux d'autodécharge $Q\ (\%)$

Lorsqu'une batterie n'est pas utilisée, elle perd de la capacité au cours du temps. Cette perte dépend de la technologie, du temps d'utilisation et de la température. Il est utile de la quantifier à partir de la capacité de stockage initiale, la capacité finale et le temps d'utilisation.

$$Q = 100 \cdot \frac{C_{Initiale} - C_{Finale}}{t \cdot C_{initiale}}$$

- Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de capacité minimum à ne pas dépasser pour éviter que la batterie soit en décharge profonde et qu'elle soit détériorée.

- Durée de vie :
  - Nombre de cycles charge/décharge.
  - Temps d'utilisation en année pour une température de 25 °C.

Lors d'une utilisation régulière, une batterie perd de la capacité à force d'être chargée et déchargée. Le nombre de cycles que peut effectuer une batterie avant d'avoir une perte de capacité élevée est fonction de sa profondeur de charge.

Les batteries au plomb sont généralement préférées aux autres technologies de batteries car elles ont un taux d'autodécharge assez faible. Elles peuvent ainsi rester connectées à l'installation sans trop se décharger.

Le nombre de batteries, le choix de la tension et leur capacité dépendent essentiellement de la consommation électrique.

La capacité de la batterie est la quantité de courant qu'elle peut fournir jusqu'à ce qu'elle atteigne un certain niveau de charge, cette valeur est directement liée à la charge de la batterie.

II.2.E.a.iv Les normes et certifications

Compte-tenu que leur tension électrique maximale est inférieure à 75 V, les stores sont soumis aux dispositions du décret n°2006-1278 du 18 octobre 2006 relatif à la compatibilité électromagnétique des équipements électriques et électroniques et aux articles R543-173 et suivants du Code de l'environnement.

L'apposition du marquage CE sur le produit fini sera issue de la réglementation relative à la compatibilité électromagnétique. En ce qui concerne la toile photovoltaïque, en elle-même, aucun texte n'impose l'apposition du marquage CE.

Dans les véhicules de loisirs (caravanes, camping-cars…), la charge des batteries électriques est soumise à la norme EN1648-1 et EN1648-2. Les batteries utilisées doivent avoir une capacité minimum de 36 A.h et doivent être entreposées dans un compartiment les protégeant de chocs. Des cellules photovoltaïques peuvent assurer la charge mais le système doit être équipé d'un système de contrôle de charge pour éviter une surcharge [21].

II.2.E.b On-Grid

Dans le but de promouvoir les énergies vertes, les gouvernements des différents pays Européens ont mis en place des tarifs préférentiels.
Le nombre d'applications raccordées au réseau (On-Grid) a beaucoup augmenté ces dernières années.

II.2.E.b.i Tarifs de rachat de l'énergie produite

- **En France**

Les tarifs de rachat d'énergie électrique diffèrent selon les pays. En France, l'achat de l'énergie produite par le distributeur est régi par l'arrêté du 12 Janvier 2010. Les tarifs sont les suivants :

- 58 c€/kW.h pour les systèmes photovoltaïques éligibles à la prime d'intégration au bâti

- 50 c€/kWh pour les installations bénéficiant de la prime d'intégration au bâti situées sur d'autres bâtiments.

- 42 c€/kW.h pour les systèmes photovoltaïques éligibles à la prime d'intégration simplifiée au bâti

Pour les autres installations, les tarifs sont les suivants :

• 40 c€/kWh en Corse, dans les DOM, à Saint Pierre et Miquelon et Mayotte

• 31, 4 c€/kWh pour les installations dont la puissance crête est inférieure ou égale à 250 kWc

• pour les installations dont la puissance crête est supérieure à 250 kWh, la formule suivante détermine le prix du rachat 31,4*R avec R étant un coefficient multiplicateur dépendant du département.

Sont considérés éligibles à la prime d'intégration au bâti les systèmes photovoltaïques répondant aux conditions suivantes :

- installés sur la toiture d'un bâtiment clos et couvert
- installés au moins deux ans après la date d'achèvement du bâtiment (à l'exception des bâtiments à usage principal d'habitation)
- installés dans le plan de la toiture
- remplacent des éléments du bâtiment qui assurent le clos et couvert et assure la fonction d'étanchéité

Par exception, le système photovoltaïque installé sur un bâtiment est éligible à la prime d'intégration au bâti s'il remplit au moins l'une des fonctions suivantes :

- allège
- bardage
- brise-soleil
- garde-corps de fenêtre
- de balcon ou de terrasse
- mur rideau

Pour que le système photovoltaïque installé sur un bâtiment soit éligible à la prime d'intégration simplifiée, ces conditions doivent être remplies :

- Le système photovoltaïque doit être installé sur la toiture d'un bâtiment assurant la protection des personnes, des animaux, des biens ou des activités et est parallèle au plan de la toiture
- Le système photovoltaïque remplace des éléments du bâtiment qui assurent le clos et le couvert, et assure la fonction d'étanchéité
- La puissance crête totale de l'installation est supérieure à 3 kWc

Le store assurant la fonction de brise soleil, il devrait être possible de bénéficier du tarif d'intégration au bâti [23].

II.2.E.b.ii L'installation

- **Equipement et installation**

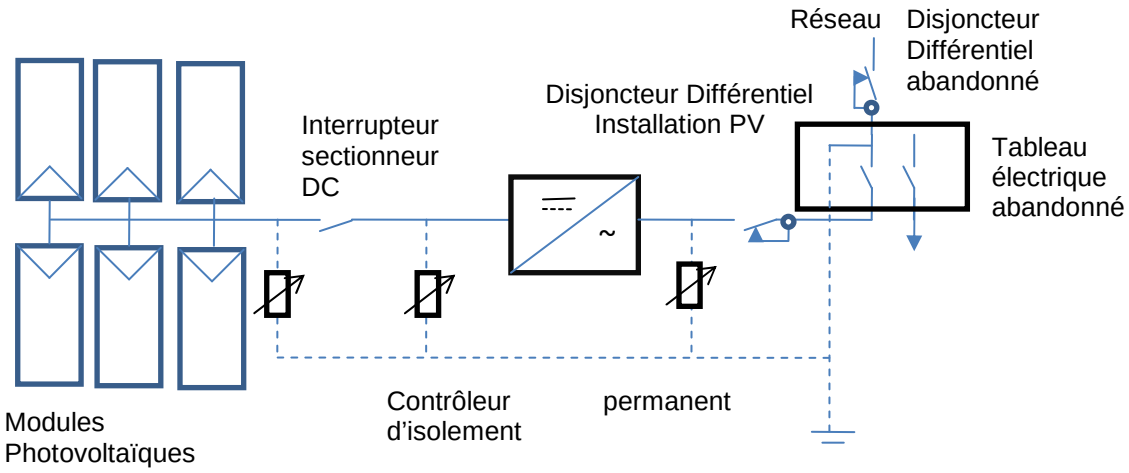


Figure 21 : *Exemple d'installation photovoltaïque pour la revente au réseau*

Les modules

Les modules doivent être équipés de boîtiers de raccordement étanches contenant les diodes by-pass. Ils doivent être équipés de connecteurs mâles et femelles isolés.

Le câblage courant continu

Les câbles utilisés doivent être de type unipolaire double isolation mono-brin. Selon le guide de l'ADEME, « Générateurs photovoltaïques raccordés au réseau » [24], le dimensionnement des câbles pour limiter les chutes de tension (maximum 1%) doit être calculé avec les critères suivants :
Pour un nombre N_s de modules en séries et N_P modules en parallèles, la tension maximum est $V_{\max} = V_{OC} \cdot N_S \cdot 1.15$ et le courant maximum $I_{Maw} = I_{CC} \cdot N_P \cdot 1.25$

L'onduleur

Cet appareil permet de convertir le courant continu produit par les panneaux photovoltaïques en courant alternatif de fréquence égale à celle du réseau. Les onduleurs incluent un système de recherche de point de puissance maximale des modules photovoltaïques (MPPT).

Le nombre d'onduleurs et la puissance de ceux-ci sont dépendants du type d'installation réalisée. En effet, plusieurs configurations peuvent être envisagées. Une installation peut comporter un onduleur par module (onduleur individuel) ou n'en avoir qu'un seul (onduleur central). Il est aussi possible de subdiviser l'installation afin d'avoir un onduleur par rangée de panneau (onduleur de rangée) et les connecter en parallèle entre eux sur le réseau. Enfin, un convertisseur DC/DC peut être installé sur chacune des rangées et être relié à un convertisseur AC/DC central. [25]

Le choix de l'onduleur dépend de l'installation photovoltaïque. L'onduleur se caractérise par :

- sa tension d'entrée (V)
- son courant admissible (A)
- sa puissance nominale (W)

La plage de tension admissible par l'onduleur doit être supérieure à la tension en circuit ouvert (V_{CO}) de l'installation photovoltaïque. De plus, le courant d'entrée admissible de l'appareil doit être supérieur à celui que peut produire les panneaux sous une radiation de 1000 W/m² et une température de 70° C. Enfin, la puissance nominale de l'onduleur ne doit pas excéder la puissance des panneaux photovoltaïques ni inférieure à un facteur de 0.7 fois la puissance du champ de module [32].

II.2.E.b.iii Les normes et certifications

En France, l'installation doit être réalisée suivant les Guides ADEME intitulés « Protection contre les effets de la foudre dans les installations faisant appel aux énergies renouvelables » et « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau ». L'installation doit comporter des dispositifs de protection contre la foudre (normes NFC 17000 et 17002).

- **Les modules**

Pour pouvoir bénéficier de la prime d'intégration au bâti, les modules doivent répondre aux normes de qualifications IEC 61215 s'il s'agit d'un module monocristallin et IEC 61646 [26] pour un module silicium amorphe. Ces normes sont relatives au respect des paramètres électriques et à la stabilité mécanique des modules dans le temps.

La norme IEC 61730 [27] est un complément de la norme 61215. Elle qualifie le comportement des modules au regard de la sécurité (risques électriques, mécaniques, incendie..).

- **L'onduleur**

Il est très important que l'onduleur respecte certains critères afin de pouvoir réinjecter l'énergie produite en toute sécurité. En France, plusieurs règles et normes sont à respecter. Afin d'éviter tout problème lors de la maintenance sur les lignes du réseau du distributeur électrique, l'onduleur doit être équipé d'un système de découplage réseau. Le système de découplage peut être soit interne, soit externe (type B1). Dans tous les cas, il devra répondre à la norme Allemande DIN VDE 0126.

La norme CEI 61727 relative à l'interface de raccordement au réseau doit être observée ainsi que la compatibilité électromagnétique (norme 61000-3-2). Aucune composante continue supérieure à celle spécifiée dans la norme CEI 61000-3-2 ne doit être générée par l'onduleur. Enfin, L'appareil utilisé doit comporter un contrôleur d'isolement côté DC permettant de prévenir d'un défaut éventuel d'isolement (entre chaque polarité et la masse) [24, 25].

Un certificat de test établi par un organisme certifié doit être associé à l'onduleur installé.

II.2.F. Technologies

Les semi-conducteurs pouvant être trouvés sous différentes formes, on distingue plusieurs familles de cellules photovoltaïques :

- Cellules Silicium
  - Monocristallin
  - Polycristallin
  - Ruban autosupporté
- Couches minces
  - Silicium Amorphe
  - CIS/CdTe
  - CIGS
- Cellules Organiques

Pour réaliser des tissus photovoltaïques dont l'application finale est le store, il faut que la technologie utilisée soit à la fois flexible et légère. Parmi les différentes

technologies décrites, on s'appliquera à voir quelles sont celles qui pourront être utilisées pour notre application.

Les processus de fabrication correspondant aux différentes technologies sont sensiblement les mêmes et se divisent en 2 parties :

- Fabrication des cellules
- Lamination

II.2.F.a Silicium Cristallin

Le silicium est le semiconducteur le plus utilisé pour les cellules photovoltaïques.
Son énergie de gap n'est certes pas optimale mais il est disponible en forte quantité, n'est pas nocif, ni onéreux [12]. De plus, aujourd'hui celui-ci est bien connu ce qui permet d'obtenir des cellules dont le rapport prix par watt crête répond au marché. La longévité de ce semiconducteur permet aussi de garantir les cellules sur une durée de 25 ans [11].

Concernant les technologies silicium mono cristallin et poly cristallin, hormis l'obtention du lingot, les étapes suivantes du processus de fabrication sont quasiment les mêmes.

Le principe est d'obtenir un lingot à partir de silicium purifié qui est ensuite découpé en briques puis en « wafers ».
L'étape suivante consiste à effectuer des traitements de surfaces visant à le nettoyer à partir d'une solution chaude d'hydroxyde de soude, et améliorer les rendements (texturation) des wafers des cellules mono cristallines avec une solution diluée d'hydroxyde de soude dans l'isopropanol [13].
Ensuite, l'émetteur est réalisé par diffusion de phosphore dans le silicium. Puis, la face avant est électriquement isolée de la face arrière du wafer : un traitement plasma supprime les débordements de phosphore sur les bords. Enfin, avant de réaliser les contacts par impression sur les faces supérieures et inférieures de la cellule, une enduction est appliquée à la surface des cellules de manière à limiter les pertes dues aux reflets de la lumière sur cette surface.

II.2.F.a.i Monocristallin

Pour obtenir des monocristaux, la méthode la plus utilisée est la méthode de Czochralski (Cz), cette méthode permet d'obtenir un lingot cylindrique de 30 cm de diamètre et 1 m de long. Le principe est de faire grandir le lingot à partir d'une matrice placée dans un creuset contenant du silicium en fusion. Le lingot croît par rotation dans le silicium fondu. Les différents paramètres tels que : la température, la vitesse de rotation et de sortie du lingot doivent être parfaitement maitrisés [13].

Cependant, la faible vitesse de croissance du lingot et les pertes très importantes lors de la fabrication de ces cellules engendrent un coût de fabrication très élevé.

Rendements et performance

Les rendements des cellules sont de l'ordre de 20 à 21% [12]. Cette technologie ne pouvant pas être utilisée sur substrat souple et les cellules étant elles-mêmes rigides, nous ne pouvons pas l'utiliser.

II.2.F.a.ii Multicristallin (mc-Si)

Pour obtenir les lingots multi cristallins, les chutes de silicium issues de la découpe des lingots sont fondues dans un creuset puis refroidies.
La qualité des cellules multi cristallines est inférieure à celle des cellules mono cristallines. Ceci est dû à la présence de grains de liaisons (zones perturbées) séparant les monocristaux obtenus.

Rendements et performance

Des cellules multi cristallines sont moins chères à produire, mais moins efficaces en termes de rendement que les cellules mono cristallines (rendement 16 à 17 %). [12] Cette technologie est la plus utilisée aujourd'hui en volume [25].

II.2.F.a.iii Silicium en Ruban (EFG:Edge defined film Fed Growth)

Cette technologie est fondée sur la cristallisation de silicium fondu à partir d'une matrice qui donne l'épaisseur.
Il n'y a donc plus de découpe de galets de silicium.

II.2.F.b Couches Minces

Les modules photovoltaïques couches minces sont une alternative aux technologies utilisant le silicium massif. Elles ne représentent encore qu'une faible partie de la production totale dans le monde soit 12 à 14 % en 2008. Cette proportion tendrait selon certaines études à augmenter de façon importante (12 GW sur les 55 GW de cellules produites annoncés en 2012 soit 24 %) [17].
De plus, de par leurs compositions ces modules sont susceptibles de pouvoir être utilisés pour des applications qui requièrent flexibilité et légèreté. En effet, les matériaux utilisés ont des coefficients d'absorption élevés ce qui permet d'obtenir des cellules très fines (structures dont l'épaisseur totale est inférieure à 5 µm). Le dépôt de la couche active est réalisé à partir de phase gazeuse ce qui permet de produire à temps égal des surfaces supérieures à celles produites pour des cellules en silicium massif.

Les cellules couches minces rassemblent plusieurs technologies :

- Silicium amorphe
- Silicium polycristallin
- Tellurure de cadmium
- Séléniure de cuivre indium (CIS)

II.2.F.b.i Silicium Amorphe (SiA)

Cette technologie repose sur l'utilisation de silicium amorphe, dont la maîtrise du dopage a été rendue possible grâce aux travaux de Spear et Le Comber en 1975 [33]. Ces essais étaient basés sur l'ajout d'hydrogène dans le silicium afin de saturer les liaisons pendantes. En effet, la composition chimique du silicium amorphe ne présente pas d'organisation atomique régulière sur une longue distance. Cependant, à l'échelle macroscopique, la configuration tétraédrique des liaisons Si-Si est respectée bien qu'un atome soit entouré de trois atomes seulement au lieu de quatre ce qui laisse un électron non apparié ce qui est appelé liaison pendante [11, 33].

Depuis, des alliages ont pu être réalisés dans le but de synthétiser des matériaux dont les largeurs de bandes interdites sont différentes et s'étendent de 1 à 2,2 eV. Ceci a permis d'obtenir des cellules photovoltaïques multispectrales [33].

Cette technologie permet d'obtenir des cellules de faible épaisseur grâce à un fort coefficient d'absorption [25].

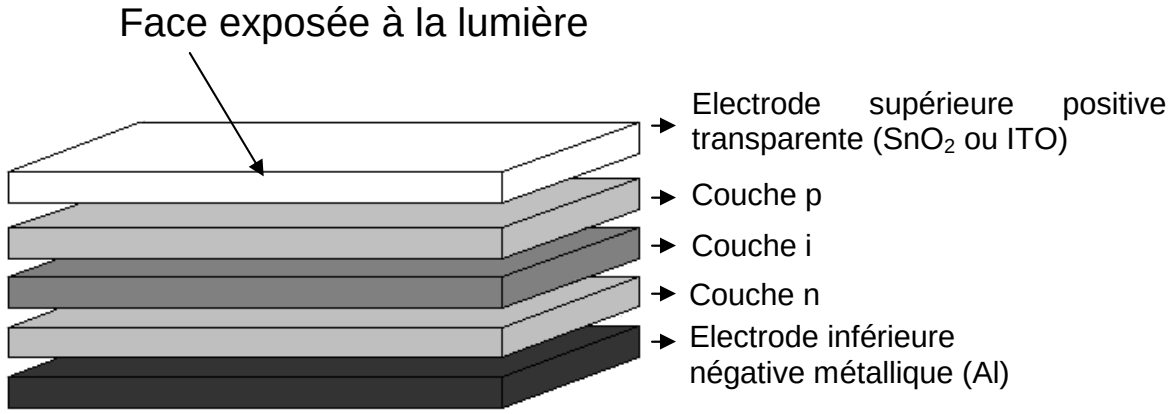


Figure 22 : *Exemple des différentes couches d'une cellule SiA*

Méthodes de déposition de la couche active

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour réaliser les cellules en silicium amorphe.

1. Dépôt sous vide
    a. Pulvérisation par spray (SD pour Sputter Deposition)
    b. Evaporation réactive au laser (RLE pour Reactive laser evaporation)
    c. Evaporation par faisceau d'électrons (EBE pour electron beam evaporation)

2. Dépôt par réactions chimiques en phase vapeur
    a. Plasma CVD (PEVCD Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition)
    b. Photo CVD (PHCVD)

La méthode la plus utilisée est la méthode Plasma CVD qui consiste à décomposer du silane en radicaux Si et espèces ioniques correspondantes en appliquant une décharge électrique entre deux électrodes en présence de ce gaz dans une enceinte sous vide. Ceci entraîne une réaction chimique qui forme sur le substrat un film mince de silicium amorphe. Les différentes régions de la cellule sont obtenues par ajout d'autres gaz au silane : du triméthylbore ou encore du diborane pour la base, de la phosphine pour l'émetteur. La couche i est obtenue soit avec du silane seul, soit avec du dihydrogène, de hélium ou encore de l'argon.
Les méthodes utilisées permettent d'obtenir pour des substrats souples des procédés roll-to-roll. Le module photovoltaïque aura une tension définie par le nombre de cellules en largeur connectées entre-elles en série :

- 26 pour les modules Flexcell application autonomes (15 V en tension nominale) [30] ;
- 13 pour les modules Flexcell application autonomes (15.4 V en tension nominale) [31].

Les modules photovoltaïques sont séparés selon un multiple de longueur (16 cm PowerFilm Solar® et 15.25 cm pour Flexcell).

Performances et rendement

Les rendements de ce type de cellules sont compris entre 4 et 8% en phase industrielle. Il est possible d'obtenir des rendements en laboratoire de 12 % grâce à des cellules dites de jonction triple dopées au Germanium. Le Germanium, une fois mélangé au silane lors de la déposition de la couche active, permet de créer des liaisons faibles et de diminuer la hauteur du gap (1.2 eV). Cependant, en 1977 Staebler et Wronski ont mis en évidence la dégradation de la cellule lors de son utilisation. Cette dégradation est appelée effet de Staebler-Wronski et peut être limitée par le nombre de jonctions : une cellule double jonction ne perd que 10 à 15 % contre 20 à 25% pour une simple jonction [25, 32].

Les pertes

Selon Brecl K, Fischer D, Smole F, Topič M, les pertes concernant les cellules silicium amorphe sont essentiellement dues à deux critères spécifiques :

- rapport conductivité/transparence de l'électrode transparente
- connexion séries des contacts monolithiques.

Concernant l'électrode transparente (Transparent Conductive Oxide : TCO), il faut établir un compromis entre transparence et conductivité : plus elle sera transparente et laissera pénétrer la lumière, moins elle sera conductrice et inversement. Le mieux est d'assister la conduction en ajoutant une grille bien que l'ombre ainsi générée induise des pertes.
Les tests réalisés sur une cellule Flexcell sont représentés Figure 23. Afin de réaliser ces tests, un modèle a été établi : les contacts monolithiques peuvent être modélisés.

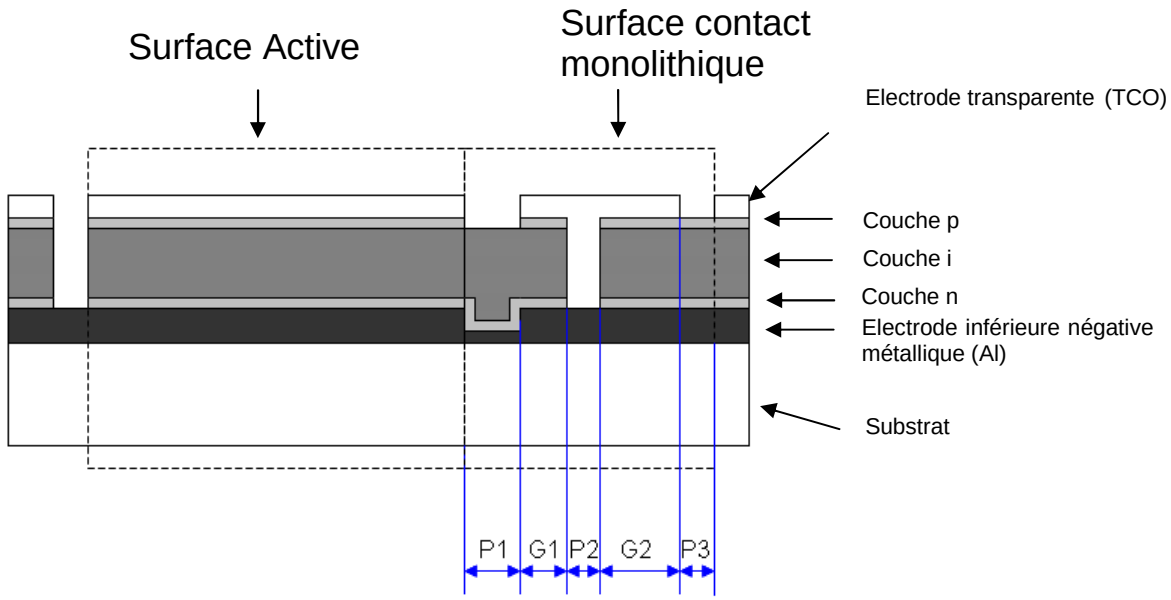


Figure 23 : *Modélisation d'une cellule photovoltaïque silicium amorphe*

La surface active se divise en petites surfaces identiques dont le nombre est défini par la règle de maillage indiquant que le résultat de la simulation ne doit pas varier de façon significative même pour des entités plus petites.

Ainsi, il a été observé que pour une largeur de grille de 10 µm, la largeur optimale de la cellule est 18 mm avec un TCO de résistance 25 Ω/m². De plus, les répétitions de la grille peuvent aussi être optimisées en fonction de la taille de la largeur de celle-ci. (Figure 25).

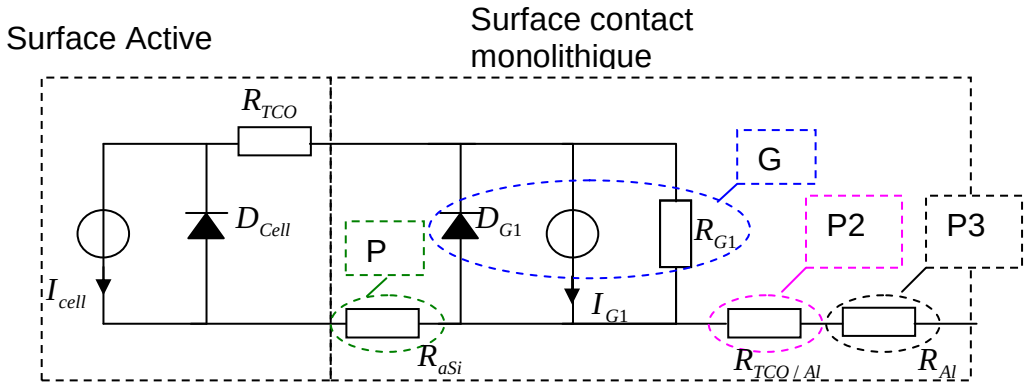


Figure 24 : *Modélisation d'une cellule photovoltaïque silicium amorphe*

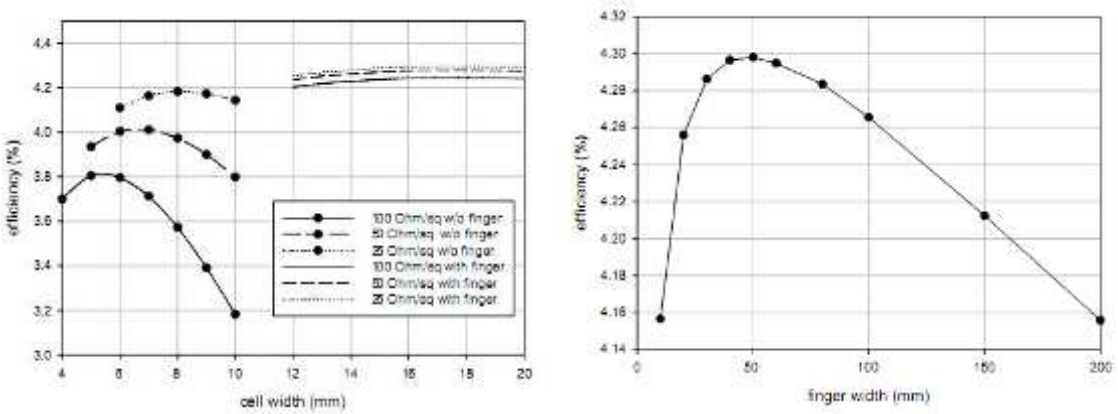


Figure 25 : *Les différents rendements obtenus en fonction de la grille et de la couche transparente conductrice*

.

Modules souples

La flexibilité et le poids de ce type de cellules sont dépendants du substrat utilisé.
Le substrat en verre est encore le plus utilisé. Beaucoup d'études sont tout de même menées pour utiliser des substrats souples permettant d'alléger les cellules photovoltaïques et leur conférer de la souplesse.

L'utilisation de substrats souples entraîne des contraintes supplémentaires dues au rayon de courbure lors de la fabrication et de l'utilisation des cellules. Ceci implique une parfaite maitrise du rayon de courbure afin d'éviter tout décalage entre les différentes couches lors du processus de fabrication [34].

Le rayon de courbure est donné par la formule suivante : $R = \frac{e_s}{6 \cdot \frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}} \cdot \frac{e_f}{e_s} \cdot \varepsilon} \cdot \frac{A+B}{C}$

Avec :

R : rayon de courbure (m)
T : température (K)
$Y_s^{'} = \frac{Y_s}{1-\nu_s^2}$ et $Y_f^{'} = \frac{Y_f}{1-\nu_f^2}$ représentants respectivement les modules de contraintes planes (Pa) du film et du substrat en fonction du module de Young du matériau (Y_S pour le substrat et Y_f celui du substrat) et de son coefficient de poisson ν. L'épaisseur du matériau est e en mètre dont l'indice précise s'il s'agit du film (noté f) ou du substrat (noté s).
ε est la contrainte de déformation dépendante du coefficient thermique d'expansion en K^{-1} du film α_f et du substrat α_s ainsi que la contrainte de formation de la couche active ε_{bi}.

$$\varepsilon = (\alpha_f - \alpha_s) \cdot \Delta T + \varepsilon_{bi}$$

$$A=\left(\left(1-\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\left(\frac{e_f}{e_s}\right)^2\right)^2+4\cdot\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\cdot\left(1+\frac{e_f}{e_s}\right)^2\right)\left(\left(1-\nu_s^2\right)+\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}^2\cdot\left(1-\nu_f^2\right)\right)$$

$$B=3\cdot\left(\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\right)^2\left(1+\frac{e_f}{e_s}\right)^2\left[\left(1-\nu_s^2\right)+\left(1-\nu_f^2\right)\right]+2\cdot\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\cdot\left(1-\nu_f\nu_s\right)\cdot\left(1+\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\right)\cdot\left(1+\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\left(\frac{e_f}{e_s}\right)^3\right)$$

$$C=\left(1+\frac{e_f}{e_s}\right)\cdot\left(1+\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\right)\cdot\left(\left(1-\nu_s^2\right)+\left(1-\nu_f^2\right)+\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\left(1-\nu_f^2\right)\left(1+\nu_s\right)\right)$$

Le second membre de la formule donnant le rayon de courbure peut se simplifier pour un coefficient de poisson du film égal à celui du substrat.

$$R=\frac{e_s}{6\cdot\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\cdot\varepsilon}\cdot\frac{A^{'}}{C^{'}}$$

$$A^{'}=\left(\left(1-\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\left(\frac{e_f}{e_s}\right)^2\right)^2+4\cdot\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\cdot\left(1+\frac{e_f}{e_s}\right)^2\right)$$

$$C^{'}=\left(1+\nu\right)\cdot\left(1+\frac{e_f}{e_s}\right)$$

Pour privilégier un rayon de courbure assez grand, il faudrait qu'un des termes du dénominateur soit le plus proche possible de 0.

$$\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}\cdot\varepsilon=0\Leftrightarrow\begin{array}{l}\frac{Y_f^{'}}{Y_s^{'}}\cdot\frac{e_f}{e_s}=0\\ \text{ou}\\ \varepsilon=0\end{array}$$

Il faut donc que le produit $Y_s\cdot e_s$ soit très grand devant $Y_f\cdot e_f$ ce qui ne peut être vérifié dans le cas de l'utilisation d'un substrat que l'on veut le plus fin possible (e_s le plus proche possible de 0), dont le module de Young (Y_s) est limité par l'utilisation de polymère mais encore à cause de l'épaisseur du film (e_f) qui ne peut être négligeable.
Sinon, il faudrait annuler ε en choisissant un substrat dont le coefficient thermique d'expansion est égal à celui du film ce qui n'est pas possible en utilisant du silicium : le coefficient d'expansion thermique du silicium est très supérieur à celui des plastiques.
D'autres méthodes plus réalisables consisteraient à limiter la température (ΔT) du processus ou encore à égaler le coefficient de formation de la couche active à celui de la différence des coefficients d'expansions du film et du substrat multiplié à la température du processus soit $\left(\alpha_s-\alpha_f\right)\cdot\Delta T=\varepsilon_{bi}$.

Autrement, le rayon peut être maitrisé durant le processus en utilisant un support rigide derrière le substrat ou lors de la croissance du silicium formant des îlots soulageant les contraintes bien que celles-ci soient localisées sur leurs bords.

Lors de la fabrication, une augmentation de rayon entraîne une contrainte de traction tandis qu'une diminution entraîne une compression. Les couches déposées se trouveraient alors décalées.

Les principaux fabricants de panneaux issus de cette technologie sont divisés en 2 catégories pour notre application. On trouve les modules rigides (Sanyo, Solems…) et les modules flexibles (Flexcell®, PowerFilm Solar®, Uni-Solar®, FujiElectric®…)

II.2.F.b.ii Silicium polycristallin

Cette technologie consiste à déposer sur divers substrats de silicium métallurgique non purifiés (quartz, céramique, silicium ou encore métaux) une couche mince de silicium polycristallin (de l'ordre de 10 à 40 µm) [25].

Méthodes de déposition de la couche active

Pour réaliser ce type de cellules, il existe plusieurs méthodes :

1. Croissance par épitaxie [35]

    a. Epitaxie en phase liquide
    b. Epitaxie en phase vapeur par plasma CVD

2. Recristallisation par fusion de zone (ZMR)

CVD assistée par filament chaud (HWCVD pour Hot Wire Chemical Vapour Deposition)

Sans recristallisation pour augmenter la taille des grains, les rendements sont inférieurs à 10%, sinon, ils sont de l'ordre de 13 à 16% [25].

La société Astropower aux Etats-Unis développe cette technologie aujourd'hui encore en phase pilote.

Modules souples

Bien que cette technologie soit intéressante, elle est encore en phase pilote et son application sur substrat silicium métallurgique ne permet pas de remplir la contrainte de flexibilité.

II.2.F.b.iii Tellurure de Cadmium (CdTe)

Le CdTe est un semiconducteur composé de type II-IV. Le coefficient d'absorption élevé et la valeur de la bande interdite (type direct) de 1.45 eV confèrent à ce semiconducteur des propriétés adaptées au spectre solaire.

En effet, il peut absorber toutes les longueurs d'onde du spectre solaire pour une finesse de quelques micromètres.

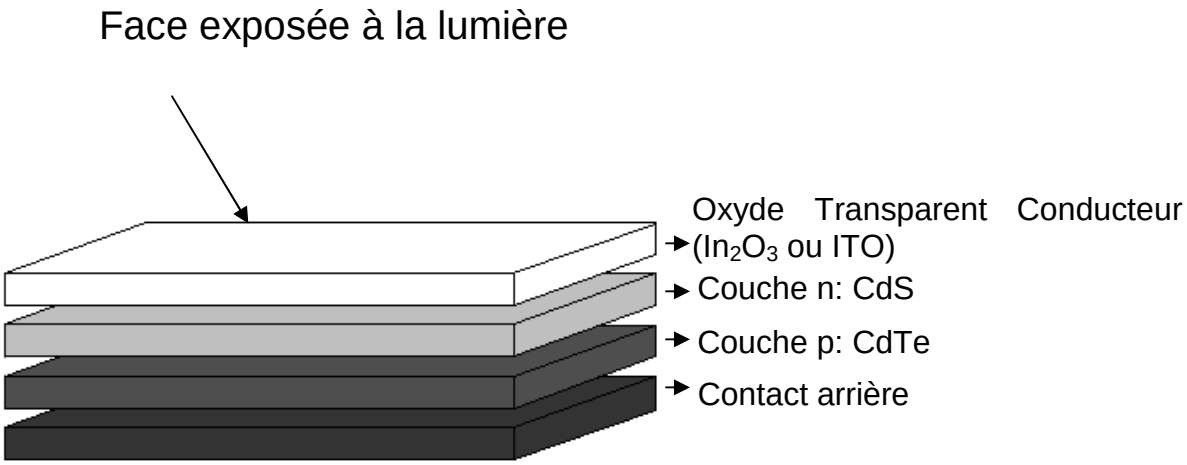


Figure 26: *Composition d'une cellule CdS/CdTe*

Méthodes de déposition de la couche active

La déposition des différentes couches se fait sur le substrat en commençant par déposer la couche de CdS. La hauteur de la bande interdite (2.4 eV) permet de faire une couche dite fenêtre dans laquelle il n'y pas d'activité photoélectrique. Puis le CdTe est déposé et enfin, l'électrode arrière. On parle d'hétérojonction CdTe/CdS.
De nombreuses méthodes pour effectuer le dépôt de la couche active peuvent être utilisées [32]:

- Dépôt sous vide
  - Dépôt physique en phase vapeur (PVD pour Physical Vapour Deposition)
  - Epitaxie en phase vapeur à courte distance (HWE pour Hot Wall Epitaxy)
  - Sublimation en espace clos (CSS pour Close Space Sublimation)
- Dépôt par réactions chimiques en phase vapeur
  - Dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour Chemical Vapour Deposition)
  - Méthode par transport en phase vapeur (CSVT pour Close Space Vapour Transport)
- Autres méthodes de dépôt
  - Dépôt électrolytique (ED pour Electrodeposition)
  - Sérigraphie (SPR pour Screen Printing)
  - Vaporisation suivie de pyrolyse (SPL pour Spray Pyrolysis)
  - Dépôt contrôlé de couches atomiques successives (ALE pour Atomic Layer Epitaxy)

Performances et rendement

Ce type de cellule a un rendement de 10 à 16% dépendant de la méthode de dépôt ainsi que de la qualité du verre utilisé comme substrat. Les meilleurs rendements ont été obtenus avec la méthode de dépôt CSS sur un verre de bonne qualité résistant aux hautes températures [32].
La principale société de production de ce type de cellules est First Solar qui utilise une technologie de déposition CSS qui est très rapide comparée à d'autres technologies.

La méthode de déposition de la couche active est très influente sur la réponse spectrale de la cellule.

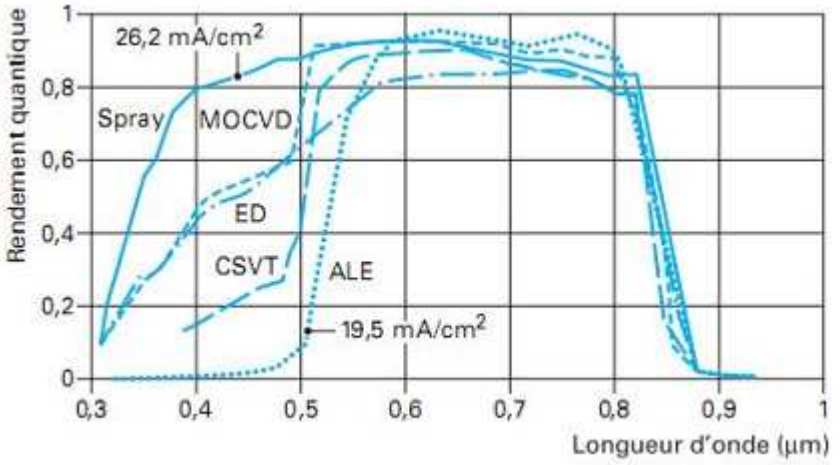


Figure 27 : *Influence de la technologie de dépôt de la couche active sur la réponse spectrale des cellules CdTe* [28]

Modules souples

Il est aussi possible d'obtenir cette technologie sur des substrats flexibles. D'après les travaux d'A. Romeo, G. Khrypunova, F. Kurdesau, M. Arnold, D.L. Bätzner, H. Zogga, A.N. Tiwari [36] le choix du substrat conditionne le rendement final de l'application. Le substrat doit résister à une température de 450 ℃ (correspondant à la température de recristallisation du CdS). Pour une configuration superstrat il doit être le plus transparent possible. La disposition des couches pour une configuration superstrat et substrat est représentée en Figure

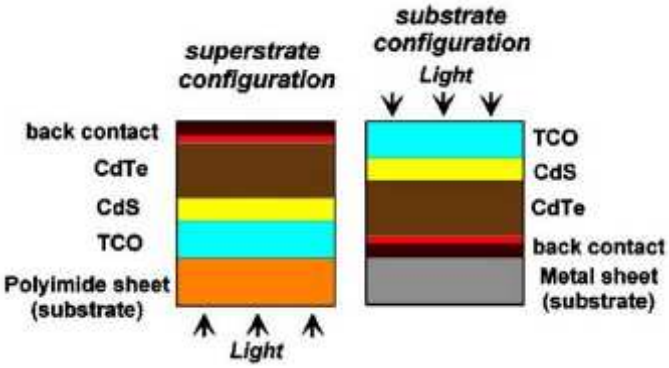


Figure 29 : *Configuration Superstrat et configuration substrat* [36]

Bien qu'il s'agisse d'un dépôt physique en phase vapeur (PVD), les méthodes de fabrication et de mises en œuvre diffèrent selon la configuration utilisée.
Les deux cas obligent d'abord un dépôt de NaCl sur un verre de type « Soda-lime ».
Pour la configuration substrat, l'Oxyde Transparent Conducteur est déposé sur cette couche, suivi par le dépôt des couches CdS, CdTe et contact arrière sur laquelle est laminé le polyimide. Cette configuration permet d'obtenir un rendement de 7.3 % et a pour avantage d'avoir le polyimide à l'arrière de la cellule ce qui permet d'éviter les pertes d'absorption et les dégradations dues aux radiations UV. Ceci est important pour des utilisations spatiales.
Dans le cas de la configuration superstrat, une enduction polyimide est ensuite déposée sur la couche NaCl puis, l'oxyde Transparent Conducteur, la couche CdS et enfin CdTe. Le rendement ainsi obtenu est supérieur à 11%.
Avant rinçage dans l'eau pour dissoudre le NaCl, un traitement CdCl2 permet d'activer l'hétérojonction CdTe/CdS.

Cependant, le développement de ce type de cellules a été confronté à la toxicité et au coût du cadmium.

II.2.F.b.iv Le diséléniure de cuivre et indium (CIS ou CIGS)

Les cellules photovoltaïques CIGS sont des hétérojonctions $Cu(In,Ga)Se_2$: Diséléniure de cuivre, d'indium et de Gallium / CdS. $Cu(In,Ga)Se_2$ est constitué de diséléniure de cuivre (CIS), matériau semiconducteur composé de type I-III-VI et dont la baisse de niveau de pureté ne modifie pas les valeurs de bande interdite qui est de 1 eV.
Le rendement théorique des hétérojonctions $Cu(In,Ga)Se_2$ /CdS est proche de 25%.

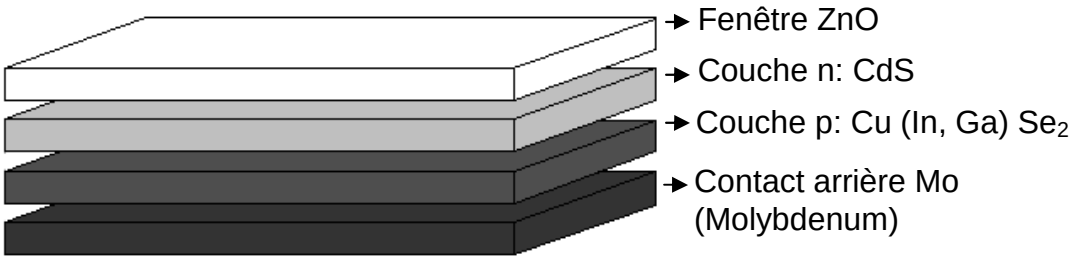


Figure 28 : *Structure générale de l'hétérojonction* $Cu(In,Ga)Se_2$*/CdS*

Méthodes de dépôt de la couche active

Le dépôt de la couche active peut être réalisé selon les méthodes suivantes :

- Dépôt sous vide
  - Dépôt physique en phase vapeur (PVD pour Physical Vapour Deposition)
  - Dépôt en Spray (SD Sputter Deposition)

- Autres méthodes de déposition
  - Dépôt électrolytique (ED pour Electro Deposition)
  - Sérigraphie (SPR pour Screen Printing)
  - Bain de déposition chimique (CBD pour Chemical Bath Deposition)
  - Spray Pyrolyse (SPL pour Spray Pyrolysis)

Performances et rendement

Le rendement des cellules de type hétérojonctions $Cu(In,Ga)Se_2$ /CdS est bien inférieur à celui escompté en théorie : 15 % sur substrat en verre [37]. Des alliages permettent cependant d'obtenir des résultats supérieurs à ceux obtenus avec des $Cu(In,Ga)Se_2$ /CdS : le NREL (National Renewable Energy Laboratory) a obtenu avec des cellules de type $Cu(In,Ga)(Se_2,S)$ un rendement de 18.8 % par la méthode de co-évaporation. Siemens a pu obtenir un rendement de 11.2% pour un module de 3830 cm² avec une méthode de dépôt séquentiel de séléniure d'hydrogène.

Modules souples

Cette technologie permet de par sa finesse et sa compatibilité avec différents types de substrats d'obtenir des modules souples dont le rendement poids/performance peut être assez élevé dans le cas d'un produit enroulable. Le coût des cellules CIGS peut être baissé dans le cas d'une production en continue (roll-to-roll par exemple).

Le choix du substrat pour ce type de cellules est crucial : il faut allier légèreté, résistance à la température, adhésion avec la couche de contact (le Molybdenum) et prix raisonnable. Le substrat doit être lisse pour éviter de faire chuter le rendement (vitesses différentes de croissance de la couche active ou encore par les impuretés que peuvent entrainer les pics de rugosité).
Il faut de plus pallier à l'absence de Na du verre dont le rôle est prépondérant dans la croissance du film, la modification du niveau de dopage et la liaison entre les grains.
Il est possible de contrôler le dépôt de sodium par les procédés suivants :

- Par dépôt par gel
- Par une opération au moment de la Co-évaporation du CIGS (utilisé par l'entreprise Solarion)
- Par couche précurseur de l'ordre d'une dizaine de nanomètres avant la couche d'absorption
- Par post-traitement

Le marché peut être spatial, ou terrestre. L'application de type spatial est cependant limitée par la demande et comprend des contraintes supplémentaires sur le module :

- Encapsulant ultra-léger pour protéger la cellule en atmosphère (avant décollage) terrestre et spatiale
- Résistance aux contraintes mécaniques engendrées par certaines phases telles que le décollage.
- Résistance aux dégradations dues au rayonnement UV et l'oxygène atomique
- Rendement de la cellule pour une exposition à AM0 et non AM1.5G

- Protection contre les arcs et les charges électrostatiques
- Contrôle de la température de la cellule en adaptant l'émissivité
- Adapter le substrat en respectant l'expansion thermique pour des conditions de températures extrêmes

Les ressources du marché terrestre telles que les équipements et le savoir faire peuvent servir pour le développement des cellules spatiales.

II.2.F.b.v Les cellules à colorants

Développées par Michael Graetzel en 1991 à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, ces cellules sont des hybrides organiques-inorganiques. Elles sont composées d'un colorant, d'un oxyde semi-conducteur inorganique et d'un électrolyte liquide.

Performances et rendement

Les 10 % de rendement en laboratoire ont été dépassés avec une cellule contenant l'électrolyte liquide. [38, 39]
Cette cellule exposée à la lumière et à une haute température est restée stable pendant 1000 heures.
Cependant, pour éviter les fuites de l'électrolyte liquide, celui-ci a été remplacé par un électrolyte solide.
Les sociétés leader sur ce marché sont G24i, Dyesol et Sharp.

II.2.F.b.vi Les cellules organiques

Ce type de cellules est constitué de semiconducteurs organiques formant une jonction Donneur/Accepteur [41].

L'absorption de photons va apporter de l'énergie aux électrons du niveau HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital). Un « trou » va se former lors du passage vers le niveau LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital). Cette paire d'électron-trou ainsi formée est nommée exciton (1 : Figure 29). L'électron et son trou sont liés par l'énergie de liaison égale à la différence du niveau LUMO et celle de l'exciton [41].

Une fois créé, l'exciton doit être dissocié pour éviter que l'électron et son trou se recombinent et transforment l'énergie en chaleur ou photoluminescence.
La durée de vie d'un exciton n'excède pas quelques nanosecondes. Les excitons doivent être transportés par diffusion (2 : Figure 29) vers la jonction-donneur accepteur. La distance à parcourir par cet exciton doit être inférieure à celle maximum qu'il pourra parcourir durant sa durée de vie (quelques dizaines de nanomètres).
La séparation des deux charges se fait grâce au champ électrique présent au niveau de la jonction : le trou passe dans le donneur et l'électron reste dans l'accepteur. La charge électrique et les modifications qu'elle induit par effet de forces électrostatiques est appelée polaron. (3 : Figure 29)
Cette séparation repose sur le fait que l'énergie de l'exciton est supérieure à celle de la paire de polarons [41].

Dans l'accepteur le polaron est de charge positive et dans le donneur de charge négative. Ils sont ensuite collectés vers les électrodes (4 : Figure 29).

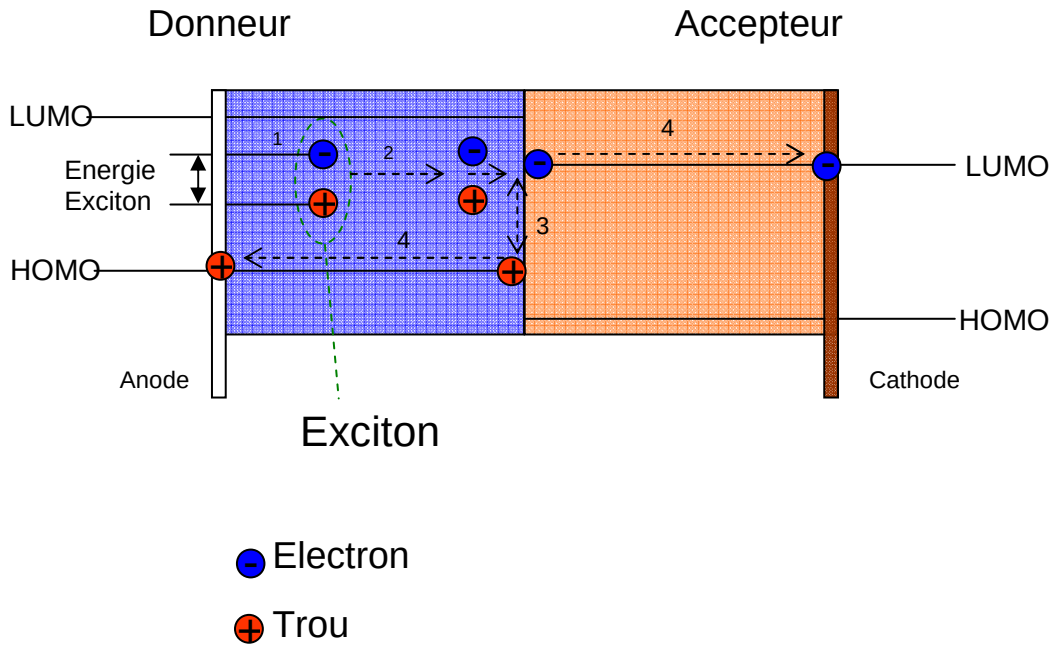


Figure 29 : *Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque*

Ces cellules ont l'avantage de pouvoir être fabriquées par des techniques simples en voie sèche ou voie humide : les dépôts sont réalisés par impression (sérigraphie, impression par racle ou jet d'encre par exemple) ou enduction (spincoating, au couteau, gravure, par calandrage).
L'impression jet d'encre permet d'effectuer des motifs plus complexes que les autres technologies. Pour permettre une diminution du prix des cellules, les méthodes à la continue sont tout de même préférées [41].

Performances et rendement

Cette technologie qui devrait être moins onéreuse que celles présentées précédemment est encore en phase pilote. Le rendement record de ce type de cellules est de 5%, il est détenu par Konarka, leader de cette technologie.
Cependant, la durée de vie de ces cellules est très courte et n'excède pas 3 ans.

Modules souples

L'avantage réside dans le fait que cette technologie permet d'obtenir des cellules sous différentes formes et apparences. Les cellules photovoltaïques peuvent être transparentes. Elles sont obtenues à partir d'une solution gel homogène à base de TiO2 de Titanium tetraortho-Butanate (TBOT) et d'éthanol. Cette solution est mélangée à du PMMA (Polymethyl methacrylate) puis déposée et séchée [42].
De même, il est aussi possible de fabriquer des cellules photovoltaïques organiques sous forme de fils. Celles-ci pourront ensuite être tissées pour remplir leur fonction photovoltaïque. Les surfaces actives sont déposées sur un substrat cylindrique. Le rendement maximum obtenu est de 3,27 % [43].

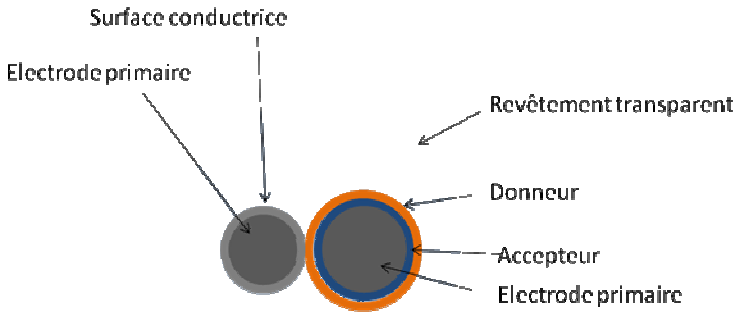


Figure 30: *Vue en coupe d'un fil photovoltaïque organique*

II.3. *Matériaux Composites*

II.3.A. Définition

D'après l'ouvrage de Daniel Gay,Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai « Composite materials: design and applications [44] les matériaux composites textiles peuvent être définis comme un assemblage de matériaux hétérogènes. De façon générale, l'un des matériaux constitue le renfort fibreux à base de fils constitués de filaments continus ou discontinus dont la résistance mécanique est forte. Ces renforts fibreux sont plus ou moins rigidifiés au sein d'une matrice de résistance mécanique inférieure.
Du fait de sa structure, une toile photovoltaïque peut être considérée comme un matériau composite. La cellule photovoltaïque s'intègre à la toile considérée comme support mécanique principal par une technique d'assemblage adaptée qui est la lamination.

II.3.B. Composites photovoltaïques rigides

Des applications composites à haute valeur ajoutée ont été développées. Les cellules photovoltaïques peuvent être utilisées dans plusieurs domaines tels que l'aéronautique (véhicules spatiaux), le bâtiment, les revêtements de sols ou encore dans les appareils électroniques transportables. C'est dans ce but que K. Jason Maung, H. Thomas Hahn, Y.S. Ju ont entrepris des travaux visant à intégrer des cellules photovoltaïques silicium amorphe dans une structure carbone/époxy. La cellule est laminée en même temps que le matériau composite est fabriqué. La cellule photovoltaïque est positionnée au dessus de la structure carbone. Entre la cellule et la couche de protection d'éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) une couche de liaison d'acétate de vinyle (EVA) est insérée. Le complexe est laminé sous vide à une température de 120 ℃, une pression de 0.55 MPa et une pression de vide de 100 kPa. Pour connaître l'impact de la température et de la pression, les cellules ont été contrôlées électriquement avant et après avoir été soumises au processus de lamination.
Après réalisation du complexe, des essais cycliques de contraintes en traction en même temps qu'une mesure de performances électriques sont effectués. Ainsi est-il possible de connaître la tension mécanique et le nombre de cycles applicables avant dégradation du comportement électrique de la cellule. Il a été noté que le

comportement électrique de la cellule est dégradé au bout d'une centaine de cycles sous contrainte de traction de 1% mais qu'aucune dégradation n'est constatée pour une contrainte de 0.3%.
La rigidité du matériau obtenu en limite le rayon de courbure [43].

II.3.C. Composites photovoltaïques souples

Lors de l'énumération des technologies au chapitre précédent, il a été remarqué que certains types de cellules peuvent être souples. Cela permet d'intégrer des cellules dans des textiles et permet de réaliser les applications suivantes :

- chargeurs souples
- tentes
- bagagerie
- stores
- membranes solaires

En effet, le besoin de confort dans notre vie quotidienne entraîne une forte dépendance aux appareils électroniques même lors de nos loisirs ou nos déplacements. Le besoin d'autonomie devient alors prépondérant que ce soit pour des applications quotidiennes et également des applications militaires. Dans ce chapitre, les applications intégrées au bâti comme les membranes photovoltaïques bénéficient aussi des avantages de ces composites souples et sont décrites dans ce chapitre.

II.3.C.a Chargeurs souples

Souvent utilisés pour des applications camping ou marine, ces produits peuvent être embarqués. Il est donc utile de limiter le poids et l'encombrement du produit. Une solution enroulable ou pliable est la plus adaptée.

II.3.C.a.i Technologies

Les chargeurs souples sont aujourd'hui principalement équipés de cellules en CIGS ou en silicium amorphe (Flexcell, PowerFilm Solar®).

Alexandre Closset de la société Flexcell est détenteur d'un brevet dont le titre est « Photovoltaic Device » (WO 2004/077576 A1) [45] concernant un chargeur solaire enroulable dans un tube protecteur et pouvant contenir une batterie rechargeable. Associé à Diego Fischer, il a déposé la même année un autre brevet (WO 2004/077577 A1) [46] concernant un autre type de chargeur solaire enroulable : « Photovoltaic Device ». Ce chargeur se différencie du précédent en s'enroulant autour d'un tube et en étant protégé par une bande velcro appartenant au chargeur. De plus, il contient une connexion électrique « allume cigare » qui permet de charger des appareils et de connecter plusieurs chargeurs solaires entre eux. L'avantage réside dans le fait que la prise allume cigare est un mode de connexion standard utilisée dans tous les véhicules.
Les supports utilisés pour ces types de chargeurs sont essentiellement des membranes en PVC et des tissus en polyester.

II.3.C.a.ii Puissance moyenne des produits

La plupart des chargeurs solaires proposés dans le commerce ont des puissances comprises entre 5 et 28 W. Selon le mode de rangement (enroulable, pliable ou à plat), ceux-ci peuvent être cylindriques ou parallélépipédiques. Le volume varie en fonction de la puissance des produits mais reste inférieur à 4000 cm^3 pour les chargeurs dont les puissances sont les plus importantes [48, 49].

II.3.C.b Bagagerie

On peut trouver des cellules photovoltaïques dans le domaine de la bagagerie pour charger les appareils électroniques tout en les transportant. Les cellules ne sont pas directement intégrées au textile mais au produit fini. Les matériaux obtenus ne sont pas issus du domaine composite photovoltaïque : des astuces de confection permettent d'ajouter les cellules sur les sacs. Contrairement aux chargeurs solaires enroulables ou transportables, il n'y a aucun problème d'encombrement une fois le produit rangé. Cependant, ce domaine d'application nécessite des cellules légères et fines.

II.3.C.b.i Technologie

Toutes les technologies peuvent être utilisées. Les cellules silicium amorphe et CIGS sont préférées. Cependant, les cellules organiques commencent à apparaître dans ces applications.
[http://www.solarbag-shop.de/french/solar-bags/shoulderbags.html]

II.3.C.b.ii Puissance moyenne des produits

Les puissances de ces sacs sont assez faibles de 1 à 3 W_c pour des technologies souples et 15 W_c pour des technologies avec des panneaux cristallins.

II.3.C.c Tentes et abris

Les tentes et les abris peuvent être utilisés pour des applications diverses dont le potentiel s'avère important. Les entreprises Konarka et SKYShades ont aussi développé des prototypes de parasols (SOLARBrella) photovoltaïques dont le but principal est de charger les ordinateurs et les téléphones portables. Ces prototypes sont aujourd'hui utilisés dans des écoles en Floride.

II.3.C.c.i Technologie

La société américaine FTL Solar LLC basée à Austin au Texas a développé des tentes et des abris solaires photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe sont intégrées sur les tissus composant les tentes ou les abris. Ces produits sont destinés aux commerces, aux applications militaires et résidentielles ou utilisés lors de sinistres [50].

De son coté, la société ShadePLex a développé le même type de produit pour des applications similaires. Les cellules utilisées sont en silicium amorphe de marque FujiElectric [51].
Le textile utilisé peut être un tissu enduit PVC, un tissu acrylique, un tissu en fibre de verre, en TPO (Thermoplastique Oléfine), ou encore un tissu enduit de PVF (fluorure de polyvinyle) [52]

II.3.C.c.ii Puissance moyenne des produits

La gamme FTL Solar LLC des protections solaires photovoltaïques de stationnement comprend 2 produits : PowerPark I et PowerPark II. Le premier a une surface de 37.1 m² par unité standard et les cellules sont issues de la marque PowerFilm Solar®. Un PowerPark I est composé de 4 modules standards unitaires soit une surface totale de 148.6 m². La puissance crête d'une telle installation avoisine les 4400 Wc pour une tension nominale de 24 V [53].
Power Park 2 est composé de cellules Uni-Solar, (8 modules standards unitaires de 680 W et de 18.5 m² de surface chacun soit au total 5440 Wc et 148.6 m²).
Ces applications permettent de recouvrir 8 places de parking [54].

ShadePlex LLC propose des applications de 92 W_c, 110 W_c et 330 W_c dont les surfaces actives sont respectivement 1.53 m², 1.58 m² et 4.73 m². Le recouvrement de la toile par les cellules est compris entre 83 et 92%.

II.3.C.d Membranes de toitures photovoltaïques

Ce type de produits est utilisé pour des toitures planes ou courbes. Plus légères que les installations traditionnelles de panneaux photovoltaïques, ces structures permettent de ne pas alourdir le bâtiment (4 Kg/m² annoncé pour une membrane de marque Evalon [55] contre 10 à 15 Kg/m² pour des cellules mono ou multi cristallines [56]). Grâce à la faible masse surfacique, l'installation est facilitée. De plus, la semi-rigidité des membranes permet d'épouser des formes courbes.

II.3.C.d.i Technologie

En majorité, les cellules utilisées sont des cellules silicium amorphe. L'entreprise leader sur cette application est Uni-solar basée aux Etats-Unis. Les cellules utilisées sont des cellules silicium amorphe triple jonction. D'autres sociétés telles que Flexcell ou PowerFilm Solar® fabriquent ce type de produits avec des cellules en silicium amorphe. Flexcell utilise un substrat en TPO (thermoplastique polyoléfine) [57].

II.3.C.d.ii Puissance moyenne des produits

Uni-Solar a une gamme comprenant 3 produits : PVL-68, PVL-136 et PVL-144. Les puissances annoncées pour ces produits sont 68 W_c pour une surface de 1,122 m², 136 W_c et 144 W_c pour des surfaces de 2,161 m². La tension à la puissance crête des membranes est de 33 V [58, 59].

Flexcell propose une membrane nommée FLX-TO200 dont la puissance crête atteint 200 W_c pour une tension de 67 V et une intensité de 3 A. La surface totale de la membrane est de 6,6 m².

II.3.C.e Stores photovoltaïques existants

Plusieurs types de stores peuvent être répertoriés : les stores verticaux et les stores bannes. Concernant les stores verticaux, quelques applications ont été développées comme celle brevetée aux Etats-Unis (US 4636579) par Joseph J Hanak, James Young, Bert Kuypers et Richard Blieden en 1987. Le principe est fondé sur les volets roulants traditionnels : une cellule photovoltaïque en silicium amorphe vient se rétracter dans un coffre de protection. [60]

Pour les stores bannes, l'engouement autour de ce produit est plus important. Plusieurs brevets ont vu le jour. En 1998 Hermann-Franck Müller dépose une demande de brevet en Allemagne intitulé « Markise mit flexiblen Solarmodulen » (DE 198 25 017 C 1). [61].

En 2001, Jacques Lambey dépose un brevet en France « Toiles photogénératrices pour stores, auvents et couvertures de piscines » [62]. Le store banne est composé de cellules photovoltaïques rigides encapsulées sur un substrat qui se replie autour d'un tube polygonal. Cette demande a été ensuite étendue à l'international sous le numéro WO 02/084044 A1. [63]

En 2006, la société Stobag fait une demande de dépôt de brevet en Allemagne (DE 10 2006 001 332 A1): « Dispositif d'ombrage, notamment store en toile». C'est au salon R+T (Rollen und Torren, Stuttgart) de la même année, que Stobag l'a présenté sous le nom de Stobosol. La toile photovoltaïque de ce prototype est composée d'un substrat acrylique teint masse et de cellules photovoltaïques en silicium amorphe enroulables autour d'un tube cylindrique mû en rotation par un moteur et comportant dans sa cavité une batterie.

En 2010, Stobag USA & Canada prévoit la commercialisation d'un store dont uniquement le moteur est alimenté par une cellule photovoltaïque de 229,32 cm² placée sur le tissu du store [52].

Lors de la journée technique JT'06 en 2006 organisée par la Haute Ecole d'Ingénierie du Canton de Vaud (HEIG-VD), un prototype de store photovoltaïque à été présenté par Pascal Goulpié. Ce store équipé de 4,2 m² de cellules photovoltaïques en silicium amorphe (Flexcell) a une avancée de 1,8 m pour une longueur de 3,8 m. Les cellules ont été laminées puis cousues sur une toile en acrylique teint masse [64]. Le store photovoltaïque a été testé sur le bâtiment des Services Industriels de Lausanne.

II.4. *Les stores résidentiels*

Placés sur un mur de façade extérieur d'un bâtiment, les stores bannes permettent de limiter la radiation solaire en générant de l'ombre : ils contribuent au confort thermique des habitants. Pour les stores extérieurs, il existe 2 grandes familles :

- stores fixes, surtout utilisés aux Etats-Unis

- stores rétractables, parmi lesquels on distingue :
  - stores cassettes ou bannes
  - stores vérandas
  - stores à projection
  - stores plissés
  - stores à lamelles
  - stores verticaux
  - stores corbeilles

L'étude portera sur les stores de type banne ou cassette, dont le système de rétraction est réalisé par enroulement autour d'un tube.

Description générale d'un store enroulable

Un store est caractérisé par les grandeurs suivantes :

- avancée
- largeur
- inclinaison

La Figure 31 et la Figure 32 montrent les différentes pièces qui composent un store banne à bras articulés.

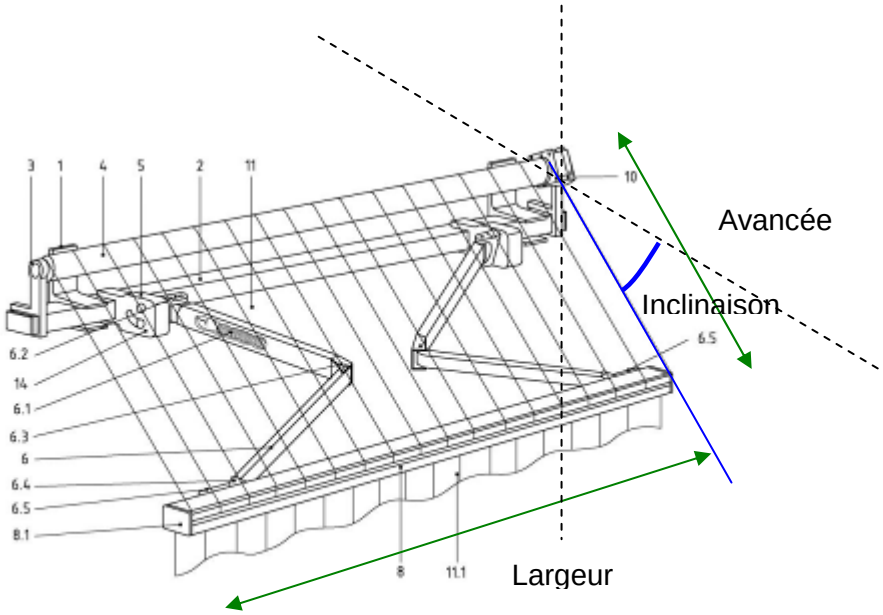


Figure 31 : *Les différents éléments composant le store* [65]

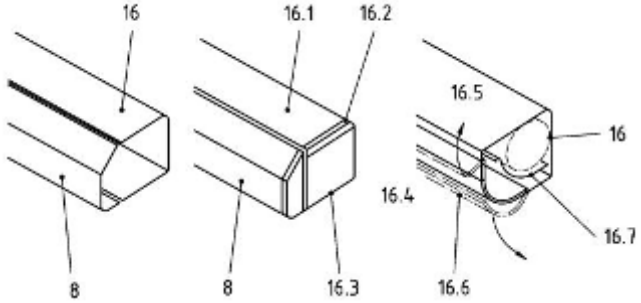


Figure 32 : *La protection de la toile (Coffre)* [65]

1. console de fixation
2. tube carré porteur
3. support de tube d'enroulement
4. tube d'enroulement
5. support de bras
6. bras articulé
6.1 profil de bras
6.2 articulation haute de bras
6.3 articulation centrale
6.4 articulation basse de bras
6.5 main pour barre de charge
6.6 verrou de bras
8. barre de charge
8.1. embout de barre de charge
9. barre de roule intermédiaire
10. système de manœuvre
11. toile
11.1. lambrequin
14. réglage d'inclinaison 16 coffre
16.1 dessus de coffre
16.2 arrière de coffre
16.3 dessous de coffre
16.4 embout de coffre
16.5 volet avant supérieur
16.6 volet avant inférieur
16.7 support d'arbre d'enroulement

Tube d'enroulement
Cylindre creux en aluminium autour duquel la toile de store est enroulée. Un jonc (câble de plastique souple) introduit dans un ourlet de la toile vient s'insérer dans une gorge parallèle à l'axe du tube.

Barre de charge
Placée à l'extrémité du store en position ouverte, la barre de charge est l'élément qui maintient la toile côté opposé au tube d'enroulement. L'assemblage entre la barre de charge et le tissu est réalisé par un jonc comme sur le tube d'enroulement.

Les bras
Leur rôle est de tendre la toile entre la barre de charge et le tube d'enroulement. Un ressort positionné dans le bras donne la tension mécanique nécessaire pour tendre la toile. Les bras permettent le repli et le déploiement de la toile de store.
La tension mécanique sur l'articulation des bras est transmise par des systèmes différents :

Bras articulés (liaison pivot)

- bras à simple câble,
- bras à double câbles,
- bras à quatre câbles,
- bras à chaînes,
- bras à ruban carbomère (alliage polymère/ carbone), ou à ruban inox.

Bras télescopiques

- bras à poussée pneumatique.

Chacun de ces systèmes permet de transmettre une poussée différente (les valeurs varient selon les constructeurs). Le système est sélectionné en fonction de l'avancée du store, de la largeur et de son exposition au vent. Le prix varie selon le type de transmission choisie.

Les bras articulés dont la liaison est assurée par un unique câble sont utilisés pour des stores à faible coût. Les liaisons par chaînes assurent une durée de vie importante mais nécessitent un entretien très régulier.
Les stores dont la tension est très forte, de grande surface (avancée et largeur importante) sont équipés de bras télescopiques.
Par exemple, Monsieur Store annonce une poussée de 780 N pour un bras à double câbles, 1050 N pour un bras à quatre câbles, 1300 N pour un bras à ruban et 1700 N pour un bras à poussée pneumatique [66].
Le lambrequin
Fixé sur la barre de charge, le lambrequin est une partie textile qui agit comme une visière. Il apporte une protection contre la luminosité du soleil couchant ou le soleil rasant de fin de journée. Cette partie peut-être motorisée pour être enroulée dans la barre de charge.

La toile

Longtemps utilisées en raison de leurs bonnes propriétés d'étanchéité et d'isolation thermique, les toiles en coton sont aujourd'hui remplacées par des toiles acryliques. Bien que la fibre de coton soit naturelle, plusieurs inconvénients lui sont attribués. Actuellement, la plupart des stores sur le marché ont des coffres compacts et sont allégés grâce à l'utilisation de bras tubulaires en aluminium.
Les toiles de coton sont nettement plus lourdes (460 à 500 g/m²) que les toiles composées de fils acryliques ou polyesters (280 à 320 g/m²), elles sont aussi plus épaisses.
Lors de l'exposition à l'extérieur, les toiles de coton sont fortement dégradées par les UV et l'humidité contrairement aux toiles d'acrylique teintes en masse qui conservent leurs propriétés esthétiques et mécaniques. Ce phénomène est accentué lorsque les toiles sont exposées en milieu salin (bords de mer).

Il faut aussi noter que les toiles en coton une fois enroulées sont soumises à des déformations importantes. La déformation la plus notable est appelée « ailes de mouette » et correspond à une tension trop faible sur les bords du store. Ceci est dû aux tensions inégales sur la longueur de la toile résultant des fortes différences d'épaisseurs (recouvrements et ourlets).
Enfin, l'inconvénient majeur est la putrescibilité du coton.

Ceci explique l'engouement pour l'acrylique teint en masse dont la finesse et le poids correspondent aux dimensions des coffres sur le marché. De plus, l'utilisation d'acrylique teint en masse dont les pigments de teinture sont intégrés lors de la formulation de la fibre confère à la toile une très bonne résistance esthétique et mécanique aux rayonnements UV et intempéries. Elles peuvent être rendues imputrescibles par traitement approprié. Des traitements chimiques peuvent aussi rendre la toile déperlante, auto-nettoyante, retardante au feu [67]…

D'autres matières sont aujourd'hui utilisées telles que le polyester teint masse dont l'esthétisme et la résistance mécanique se dégradent assez vite dans le temps en comparaison avec l'acrylique teint masse.

Pour équiper les stores enroulables, on choisit de fabriquer des toiles dont la résistance mécanique est plus forte en chaîne qu'en trame. Cette résistance est

conférée par une densité de fils supérieure dans la direction que l'on souhaite plus résistante. La chaîne est orientée en direction de l'avancée et doit résister à l'effort de traction.

Pour des raisons d'esthétisme, de comportement mécanique et de pratiques liées à la fabrication et au transport, la laize du tissu ne peut pas excéder 150 cm. De coutume, dans la profession le standard est établi à 120 cm. Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs lés ou pièces de tissu pour faire un store de grande largeur. Les lés sont assemblés par des confectionneurs. Les lés sont assemblés par coutures, par collage ou par soudure. L'assemblage est réalisé en général de façon à ce que les lés soient orientés perpendiculairement à la barre de charge. Pour éviter les risques d'effilochage, les confectionneurs font un ourlet sur les parties de toile en bordure du store.

Protection de la toile

Un coffre ou une cassette en aluminium protège la toile et les bras. Une casquette en aluminium peut être mise à la place du coffre au dessus du tube d'enroulement protégeant ainsi la toile enroulée.

Automatisation et motorisation des stores

L'entreprise leader sur le marché de l'automatisation des stores est Somfy du groupe Simu. Cette entreprise est associée à notre projet de store photovoltaïque comme partenaire.
Pour le déploiement des stores, les moteurs utilisés sont des moteurs asynchrones tubulaires monophasés à condensateur de déphasage [68] Le rotor, le stator, le réducteur, le frein et le condensateur de démarrage sont intégrés dans un tube de forme cylindrique. Le diamètre du moteur est légèrement inférieur à celui du tube d'enroulement et sa longueur est fonction de sa puissance nominale [68].



Figure 33 : *Composition d'un actionneur tubulaire Somfy* [69]

Les commandes des moteurs peuvent être filaires ou « radio ». L'ouverture et la fermeture du store peuvent être commandées de façon automatique en fonction de la luminosité (capteur Sunis®), ou du vent (capteur Eolis®). Pour parer à une éventuelle panne de moteur, une manivelle de secours équipe certains stores.

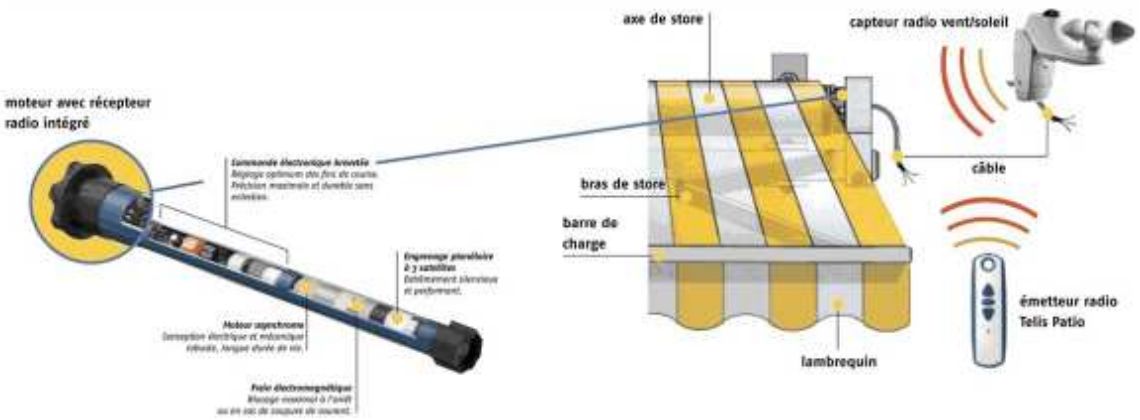


Figure 34 : *Fonctionnement moteur tubulaire* [70]

II.4.A. Particularités des stores camping-cars

Pour assurer le confort des utilisateurs, les stores équipent les camping-cars de série. Ces stores permettent de générer de l'ombre devant l'entrée du véhicule. Ils assurent ainsi la régulation de la température dans le camping car et apportent une surface de confort à l'extérieur du véhicule.
Omnistor est le partenaire que nous avons choisi pour réaliser le projet de store photovoltaïque camping-car. Appartenant au groupe Thule, Omnistor est le leader sur le marché du store camping-car.

II.4.B. Description

II.4.B.a Armature

En général, les stores utilisés sont des stores à bras articulés. Les armatures sont composées d'un coffre dans lequel est fixé le tube d'enroulement. Une fois la toile repliée, le coffre est fermé par la barre de charge et un volet inférieur ; il renferme aussi les bras. (Figure 32)
Pour optimiser l'encombrement en position fermée, le tube d'enroulement est placé au dessus de la barre de charge et les bras s'emboîtent entre ces 2 parties. Le sens de rotation du tube d'enroulement est donc inversé par rapport au sens d'enroulement d'un store traditionnel. (Figure 35)

II.4.B.a.i Dimensions

Les coffres de stores utilisés pour équiper les camping-cars doivent être les plus légers et les plus fins possibles. Ces contraintes sont utiles pour limiter la prise au vent du véhicule et éviter d'élargir sa largeur totale et de l'alourdir.
La largeur des stores est comprise entre 2 et 7 m. L'avancée est généralement proportionnelle à la largeur et varie de 1,4 m à 2,75 m.

II.4.C. Les différents composants d'un store

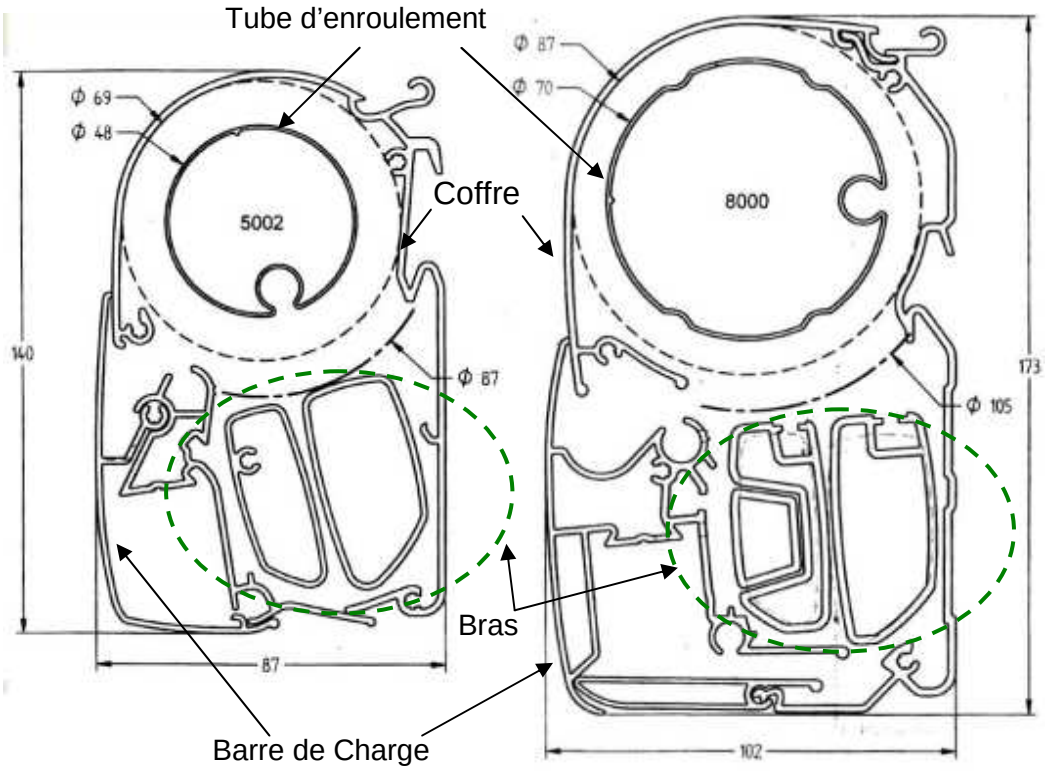


Figure 35 : Vue en coupe de stores de camping-car OMNISTOR modèles 5002 et 8000

Les bras de ce type de stores sont des bras à simple câble. Pour le modèle Omnistor 8000, la force poussée est de 100 N en position ouverte. Le diamètre du tube d'enroulement dépend du modèle de store : chez Omnistor, il peut être de 48 mm, 52 mm, 62 mm ou 70 mm.

II.4.C.a La toile

II.4.C.a.i Composition

La plupart des constructeurs de stores utilisent des toiles de polyester enduites en PVC pour limiter le prix du produit final. Le poids de cette toile est d'environ 425 g/m² et son épaisseur 0,5 mm.

II.4.C.a.ii Assemblages

L'assemblage des lès est réalisé parallèlement à la barre de charge c'est-à-dire perpendiculaire à un assemblage traditionnel. Pour conserver l'étanchéité de la toile, les toiles enduites PVC sont assemblées par soudure haute fréquence. L'accroche sur le tube d'enroulement et la barre de charge est réalisée par des joncs à lèvres cousus sur la toile. Il n'y a pas d'ourlet sur les bords de la toile de store.

II.4.C.a.iii Automatisation et motorisation des stores

Les stores de camping-cars sont équipés des mêmes moteurs tubulaires que les stores résidentiels.

III. Réalisation d'un tissu photovoltaïque

III.1. *Mise en Œuvre*

III.1.A. Les cellules photovoltaïques utilisées dans le cadre de l'étude

Les cellules photovoltaïques utilisées dans le cadre de ma thèse de doctorat sont des cellules en silicium amorphe. Cette technologie, dont la finesse, la flexibilité et le poids sont adaptés à notre application, présente aussi l'avantage d'être en phase d'industrialisation en Asie, en Europe et aux Etats-Unis.
Le but des industriels est de réaliser un modèle standard unitaire en largeur, dont la longueur variable dépend de la puissance électrique requise. Pour ce faire, il est utile de considérer les différentes applications selon les contraintes qui les caractérisent.

Les critères de caractérisation de stores que nous avons mis en place dans le cadre de cette thèse de doctorat sont définis ci-dessous :

III.1.A.a Encombrement toile roulée dans le store

Il est utile, lors du développement du nouveau produit, de connaître l'encombrement induit par l'enroulement de toile autour de son tube. Le diamètre final est une fonction dépendant de l'épaisseur de la toile, de sa longueur, de la compression du tissu, mais aussi de la tension appliquée lors de l'enroulement. Ainsi, des modèles permettant d'appréhender la place occupée par la toile enroulée ont pu être établis (remarque : pour des raisons de simplification la tension de la toile et la compression ne sont pas prises en compte dans les modèles mathématiques).

III.1.A.a.i Modélisation par méthode des aires

Soit un rayon final d'enroulement défini de la manière suivante :
$n = \frac{R_{Fin} - R_{Init}}{e}$ avec n arrondi à l'entier inférieur le plus proche car un tour entamé occupe la même place qu'un tour complet.

Soit le rayon final pour n tour : $R_{Fin} = (n \cdot e) + R_{Init}$

$$l = \frac{Aire\ Disponible}{epaisseur} = \frac{\pi}{e}\left(R_{Fin}^2 - R_{Init}^2\right)$$

Avec :

l : longueur de la toile (mm)
R_{Fin} : rayon final (mm)
R_{Init} : rayon initial (mm)
e : épaisseur (mm)

Remarque: d'autres méthodes peuvent être utilisées :

III.1.A.a.ii Modélisation par la somme des cercles concentriques

$$l = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \left(R_{Init} + \frac{(n-1) \cdot e}{2} \right)$$

$$l = \frac{\pi}{e} \cdot \left(R_{Fin} \cdot \left(R_{Fin} - e \right) - R_{Init} \cdot \left(R_{Init} - e \right) \right)$$

On s'aperçoit que ce modèle est proche du modèle obtenu avec l'aire de la couronne mais ajoute un deuxième terme qui correspond à l'endroit où est mesuré le rayon final par rapport à l'épaisseur du tissu. Pour une épaisseur fine de tissu, le deuxième terme de l'équation suivante est négligeable :

$$l = \frac{\pi}{e} \cdot \left(\left(R_{Fin}^2 - R_{Init}^2 \right) - \left(R_{Fin} \cdot e - R_{Init} \cdot e \right) \right)$$

III.1.A.a.iii Modélisation par équation de spirale

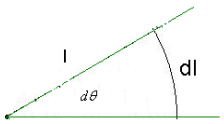
L'enroulement d'un store peut être assimilé à une spirale d'Archimède d'équation polaire $\rho = a\theta$.

Avec :

$$dl = \rho \; d\theta = a \cdot \theta \; d\theta$$

$$a = \frac{e}{2\pi}$$

D'où, $dl = \frac{e}{2\pi} \cdot \theta \; d\theta$



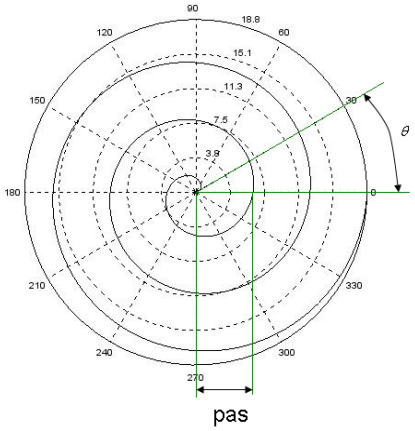


Figure 36: *Vue en coupe enroulement.*

ρ : rayon (mm)
a : pas de la spirale (mm)
dl : longueur de la spirale pour l'angle $d\theta$ (mm)
θ : angle (radian)
e : avance par tour (épaisseur tissu) (mm)
R_{Int} : rayon du tube d'enroulement pour N_1 tours (mm)
R_{Ext} : rayon final de la spirale pour N_2 tours (mm)

La longueur dl est donnée par l'intégrale comprise entre les angles θ_1 et θ_2 multiples de $2 \cdot \pi$ (pour satisfaire la condition d'un nombre de tours entiers). D'où $\theta_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1$ et $\theta_2 = 2 \cdot \pi \cdot n_2$ avec $n = \frac{R}{e}$. On s'aperçoit donc que cette méthode est similaire à la méthode des aires énoncée précédemment et donne le même résultat.

$$l = \int_{2\cdot\pi\cdot n_1}^{2\cdot\pi\cdot n_2} \frac{e}{2\pi}\,\theta d\theta$$

Donc :

$$l = \int_{2\cdot\pi\cdot\frac{R_1}{e}}^{2\cdot\pi\cdot\frac{R_2}{e}} \frac{e}{2\pi}\,\theta d\theta$$

$$l = \frac{e}{2\times\pi}\left[\frac{\theta^2}{2}\right]_{2\cdot\pi\cdot\frac{R_1}{e}}^{2\cdot\pi\cdot\frac{R_2}{e}}$$

$$l = \frac{4\pi^2\times e}{4\pi\times e^2}\cdot\left(R_2^2 - R_1^2\right)$$

$$\boxed{l = \frac{\pi}{e}\cdot(R_2^2 - R_1^{\,2})}$$

Ces méthodes ont pu être vérifiées expérimentalement de manière simple. L'enroulement d'une bande de matière autour d'un tube de rayon $R_{Init} = 315$ mm a été réalisé. Cette bande est composée de $l_1 = 100$ cm de tissu d'épaisseur $e_1 = 0.65$ mm et de $l_2 = 130$ cm de laminat et tissu d'épaisseur $e_2 = 1.7$ mm.

La valeur du rayon final mesuré $R_{Fin} = 43.6$ mm est égale à celle que l'on pourrait calculer avec la méthode des aires.

Cette méthode permet de tracer grâce à l'équation la section de l'enroulement et de vérifier ainsi la pertinence des calculs. La Figure 37 est une photo de l'enroulement de la toile ainsi calculée et schématisée. Pour les besoins de lamination, la toile est plus longue d'un centimètre. On s'aperçoit que le tracé est très proche de la réalité. Ceci est l'un des modèles et nous aurions aussi pu tracer une superposition de cercle. La Figure 38 représente la schématisation de la vue en coupe de l'enroulement de la toile.



Figure 37 : *Photographie de l'enroulement d'une toile de store autour d'un tube d'enroulement (vue en coupe sectionnelle)*

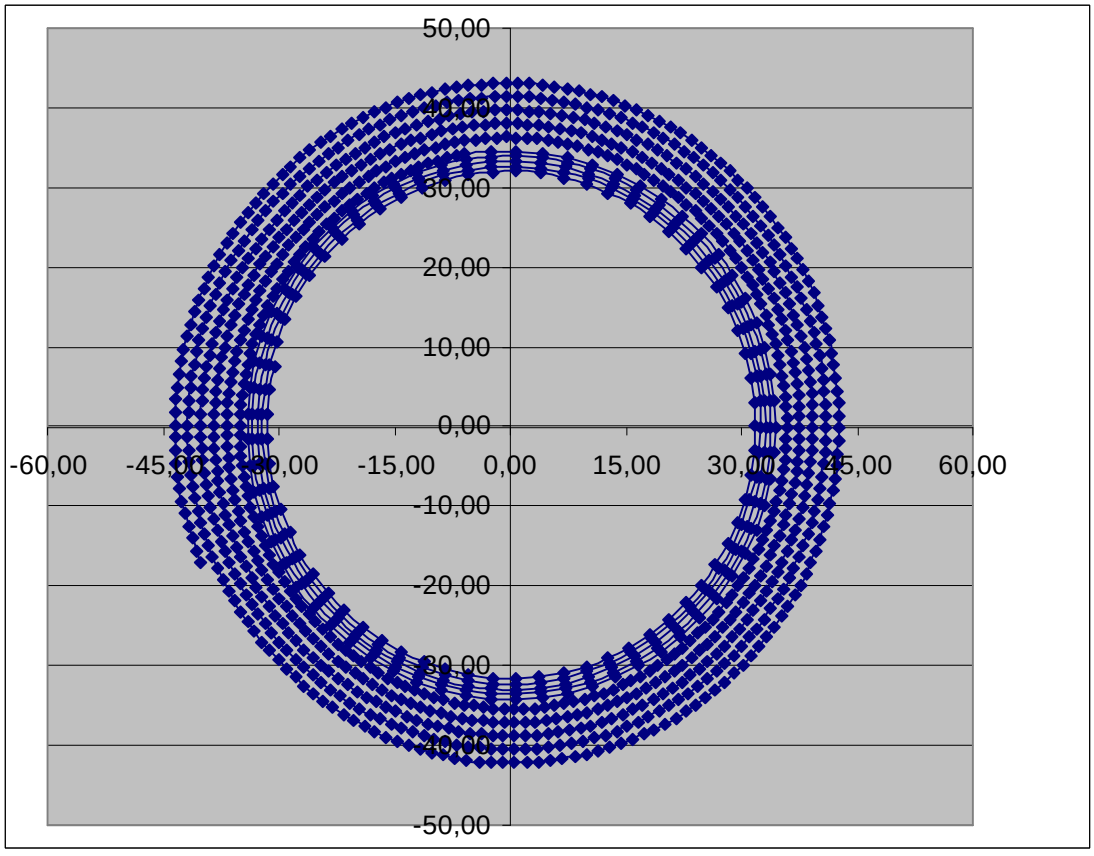


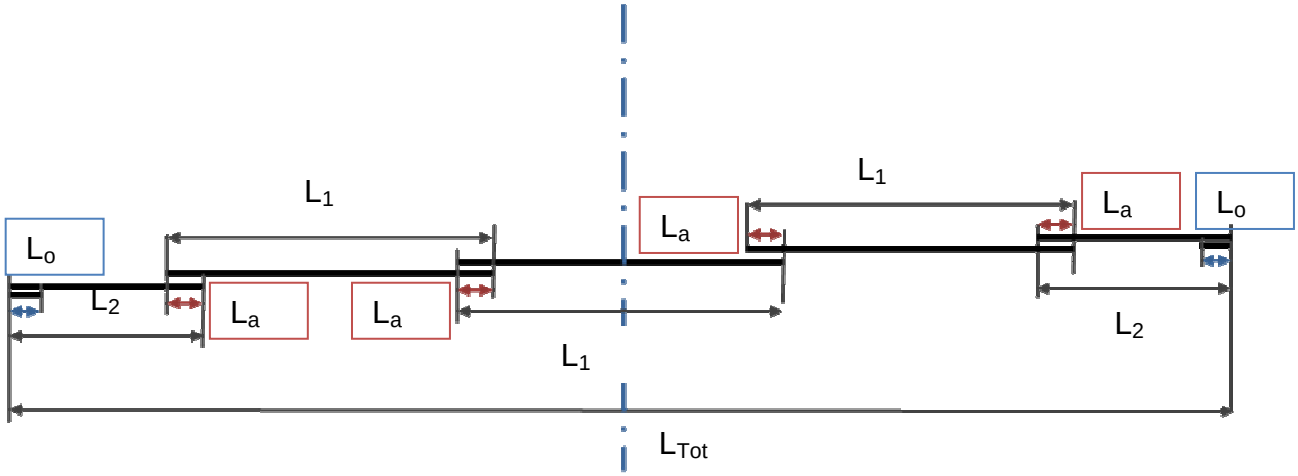
Figure 38 : *Modélisation de l'enroulement d'une toile de store autour d'un tube d'enroulement cylindrique suivant le modèle « spirale d'Archimède » (vue en coupe sectionnelle)*

Sur certaines parties du store (assemblages et ourlets), l'épaisseur est égale au double d'épaisseur de tissu. En admettant qu'il n'y ait aucune compression du tissu due à l'enroulement, il faut compter une épaisseur double de tissu pour calculer l'encombrement du store.

Pour le store photovoltaïque, l'épaisseur prise pour calculer l'avancée du store est l'épaisseur la plus grande sur une même largeur du store. Il est important de noter aussi que le premier tour d'enroulement de la toile du store n'est jamais déroulé. Ce premier tour est communément nommé tour mort.

III.1.A.b La largeur du store

La largeur du store est dépendante de son avancée. En effet, pour un store comportant deux bras, lorsque le store est fermé les bras repliés doivent avoir une longueur au plus égale à la largeur du store. C'est-à-dire que l'avancée est au plus égale à la moitié de la largeur du store. De manière générale, la longueur d'un bras d'un store correspond au plus à deux fois la largeur du store divisé par le nombre de bras. Cependant, comme évoqué précédemment, différents lés sont assemblés. Il faut donc calculer de façon précise la largeur finale du tissu afin que celle-ci ne soit ni trop grande ni trop petite. De façon conventionnelle, les confectionneurs utilisent des lés de 120 cm. Une largeur de store est donc réalisée avec des tissus de laize 120 cm et un complément de toile de largeur inférieure est ajouté sur les bords du store pour obtenir la largeur totale désirée. Le store est donc confectionné de façon symétrique suivant son axe central.
Il faut cependant tenir compte des dimensions des assemblages et des ourlets pour ne pas être trop éloigné de la largeur admissible.



$$L_{Tot} = n \times L_1 + 2 \times L_2 - \left((n-1) \cdot L_a + 2 \times L_o\right)$$

Figure 39 : *Schéma d'un assemblage de plusieurs lés composant un store (vue en coupe transversale par rapport à l'avancée)*

Avec
L_{Tot} : largeur totale du store (cm)
L_1 : largeur conventionnelle d'un lé (cm) (généralement 120 cm)
L_2 : largeur des lés de bords (cm)
L_a : largeur de recouvrement (cm)
L_o : largeur des ourlets (cm)
n : nombre de lés (n entier naturel) (cm)

III.1.A.c - Comportement mécanique de la toile

Connaître le comportement mécanique permet de connaître la poche, c'est-à-dire le point le plus bas du store. Le modèle le plus simple consiste à représenter la toile comme une somme d'éléments linéiques. Le store peut ainsi être modélisé en chacun des points de sa largeur comme un ensemble de fils suspendus. Les zones de recouvrement sont plus rigides que les épaisseurs simples. Ces zones servent aussi de support à l'ensemble des fils de trame constituant le lé. L'allongement du tissu déforme les bords de la toile comme une éprouvette soumise à un effort de traction sur un dynamomètre.

On peut simplifier le modèle en déterminant l'équation dite de « Chainette » dans le sens de l'avancée du store.

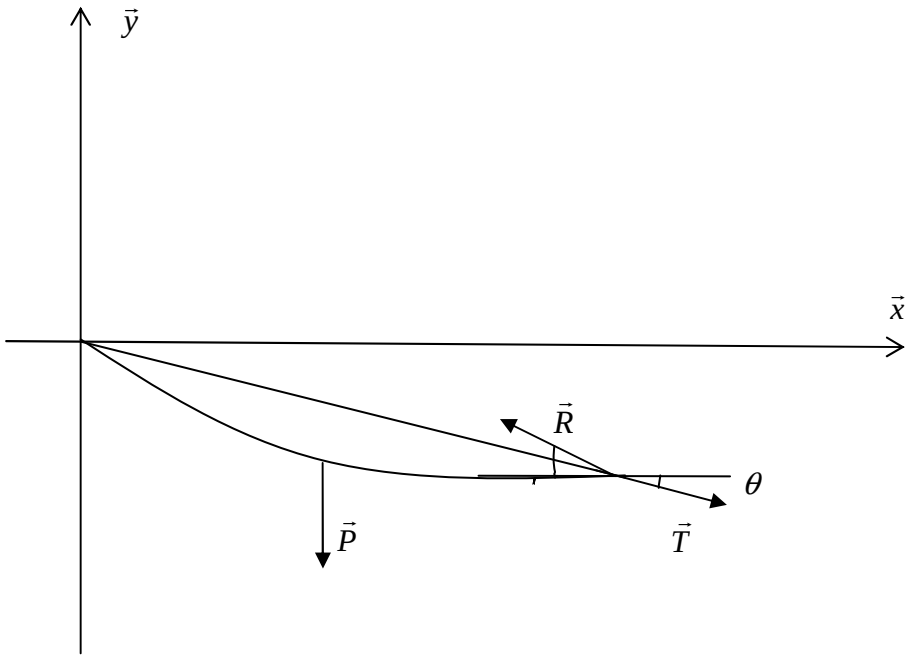


Figure 40 : *Modélisation de la toile photovoltaïque*

On considère la toile comme un fil inextensible de longueur $l\,(m)$ sous l'action de son propre poids $m_l \cdot l\ (kg)$ réparti uniformément sur l'ensemble de la longueur du fil.

Soit $\vec{T}$ la tension tangentielle appliquée à l'élément de fil et $\vec{R}$ la résultante de la tension de résistance maintenant le système isolé à l'équilibre statique.

Prenons un élément linéique composant le fil.

Nous avons la charge uniformément répartie sur l'ensemble de la longueur $m \cdot dl$ et des tensions tangentielles $\vec{T}$ et $\vec{R}$ avec $\vec{R} = \vec{T} + d\vec{T}$

En isolant la toile et en appliquant le principe fondamental de la statique on obtient :

$$\sum \vec{F} = \vec{0}$$
$$d\vec{T} + \vec{P} = \vec{0}$$

$\vec{T}_y = \vec{T}_x \tan\theta$

Avec $\vec{P} = m \cdot \vec{g} = m_l \cdot l \cdot \vec{g}$

Grâce à l'équation précédente, on peut déduire :

$$\frac{dT_x}{dl} = 0$$
$$\frac{dT_y}{dl} = m_l g$$

$$T_x = Cste$$
$$T_y = m_l \cdot g \cdot l$$

$$\tan\theta = \frac{T_y}{T_x} = \frac{m_l \cdot l \cdot g}{T_x} = \frac{l}{\beta} \text{ avec } \beta = \frac{T_x}{m_l \cdot g}$$

En coordonnées cartésiennes on a $\tan\theta = \frac{dy}{dx} = y'$.

$dl^2 = dx^2 + dy^2$ soit $l^2 = \int \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right) \cdot dx^2$ d'où $l = \int \sqrt{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)} \cdot dx$

En remplaçant dans l'équation précédemment obtenue on obtient :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\int \sqrt{\left(1 + dy^2\right)} \cdot dx}{\beta}$$
$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{\beta} \cdot \sqrt{\left(1 + dy^2\right)}$$

$$y'' = \frac{1}{\beta}\sqrt{1 + y'^2}$$

$$y'' = \frac{1}{\beta}\sqrt{1+y'^2}$$

On ramène l'équation au premier degré en posant : $u = y'$ et on intègre

$$\int \frac{u'(x)}{\sqrt{1+u^2(x)}}dy = \ln\left(u(x)+\sqrt{1+u^2(x)}\right)+A$$

Avec $A = Cste$

$$\ln\left(u(x)+\sqrt{1+u^2(x)}\right)+A = \frac{x}{\beta}$$

$$u(x)+\sqrt{1+u^2(x)} = e^{\frac{x}{\beta}-A}$$

Ce qui donne :

$$y' + \sqrt{1+y'^2}\times -\frac{1}{y'-\sqrt{1+y'^2}} = e^{\left(\frac{x}{\beta}-A\right)} - e^{-\left(\frac{x}{\beta}-A\right)}$$

$$y' = \frac{1}{2}\left(e^{\frac{x}{\beta}-A} - e^{-\left(\frac{x}{\beta}-A\right)}\right)$$

On intègre une deuxième fois pour obtenir l'équation cartésienne :

$$y = \frac{\beta}{2}\left(e^{\frac{x}{\beta}-A_1} + e^{-\left(\frac{x}{\beta}-A\right)}\right)+B$$

Détermination des conditions initiales :

$$y(0) = 0$$
$$\frac{\beta}{2}\left(e^{-A}+e^{A}\right)+B = 0$$
$$B = -\frac{\beta}{2}\left(e^{A}+e^{-A}\right)$$

D'où l'équation paramétrique finale :

$$y = \frac{\beta}{2}\left(e^{\frac{x}{\beta}-A} + e^{-\left(\frac{x}{\beta}-A\right)}\right)+\frac{\beta}{2}\left(-e^{A}-e^{-A}\right)$$

La constante A peut être déterminée avec les conditions initiales définies par la position de la barre de charge : $\{x = x_{BC}; y = y_{BC}\}$

$$\left(e^{-\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right)e^{2A} - \frac{2y_{BC}}{\beta}e^{A} + \left(e^{\left(\frac{x_{BC}}{\beta}\right)} - 1\right) = 0$$

En posant $X = e^{A}$ on résout l'équation du second degré :

$$\left(e^{-\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right)X^{2} - \frac{2y}{\beta}X + \left(e^{\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right) = 0$$

On obtient : $\Delta = \left(\frac{2 \cdot y_{BC}}{\beta}\right)^{2} - 4 \cdot \left(e^{\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right) \cdot \left(e^{-\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right)$

Cette équation a comme solution positive :

$$X = \frac{\frac{2y_{BC}}{\beta} - \sqrt{\left(\frac{2 \cdot y_{BC}}{\beta}\right)^{2} - 4 \cdot \left(e^{-\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right) \cdot \left(e^{\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right)}}{2 \cdot \left(e^{-\frac{x_{BC}}{\beta}} - 1\right)}$$

$A = \ln|X|$

D'où l'équation finale du profil de la toile de store :

$$\boxed{y = \frac{\beta}{2}\left(\frac{1}{X}\left(e^{\frac{x}{\beta}} - 1\right) + X\left(e^{-\frac{x}{\beta}} - 1\right)\right)}$$

Pour trouver les coordonnées de la flèche, il faut connaître le point de la courbe le plus éloigné de la droite du maintien des 2 extrémités Δm (reliant la barre de charge et le tube d'enroulement). Le théorème des accroissements finis s'applique à cette situation. Si une fonction f est continue sur $[a,b]$et dérivable sur $]a,b[$, alors il existe un point $x_0$de $]a,b[$ tel que le nombre dérivé de f en ce point soit le taux de variation entre a et b.

C'est-à-dire :

$$f'(x_0) = \frac{f_a - f_b}{a - b}$$

La droite de maintien des 2 extrémités Δm est définie par l'équation : $y = \frac{y_{BC}}{x_{BC}} x$

On cherche donc x_c pour lequel $f'(x_c) = \frac{y_{BC}}{x_{BC}}$

$$\frac{1}{2}\left(e^{\frac{x_c}{\beta} - A} - e^{-\left(\frac{x_c}{\beta} - A\right)} \right) = \frac{y_{BC}}{x_{BC}}$$

$$\left(e^{2\cdot\left(\frac{x_c}{\beta} - A\right)} - 2 \cdot \frac{y_{BC}}{x_{BC}} \cdot e^{\frac{x_c}{\beta} - A} - 1 \right) = 0$$

On pose $K = e^{\left(\frac{x_c}{\beta} - A\right)}$

$$\Delta_2 = \left(2 \cdot \frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 4$$

$$\Delta_2 = 4 \cdot \left(\left(\frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 1 \right)$$

Soit les solutions $K_1 = \frac{2 \cdot \frac{y_{BC}}{x_{BC}} - \sqrt{\Delta_2}}{2} = \frac{y_{BC}}{x_{BC}} - \sqrt{\left(\frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 1}$ et

$$K_2 = \frac{2 \cdot \frac{y_{BC}}{x_{BC}} + \sqrt{\Delta_2}}{2} = \frac{y_{BC}}{x_{BC}} + \sqrt{\left(\frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 1}$$

La solution K_2 étant positive, nous pouvons déterminer la valeur de x répondant à notre condition.

Soit : $e^{\left(\frac{x_c}{\beta} - A\right)} = \frac{y_{BC}}{x_{BC}} + \sqrt{\left(\frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 1}$

D'où $x_c = \beta \cdot \left(\ln \left| \frac{y_{BC}}{x_{BC}} + \sqrt{\left(\frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 1} \right| + A \right)$

Les coordonnées du point du creux le plus bas du store sont donc :

$$\{x_c ; y_c\} = \left\{ \beta \cdot \left(\ln \left| \frac{y_{BC}}{x_{BC}} + \sqrt{\left(\frac{y_{BC}}{x_{BC}} \right)^2 + 1} \right| + A \right) ; \frac{\beta}{2} \left(\frac{1}{X} \left(e^{\frac{x_c}{\beta}} - 1 \right) + X \left(e^{-\frac{x_c}{\beta}} - 1 \right) \right) \right\}$$

La profondeur du creux peut être définie de façon trigonométrique :

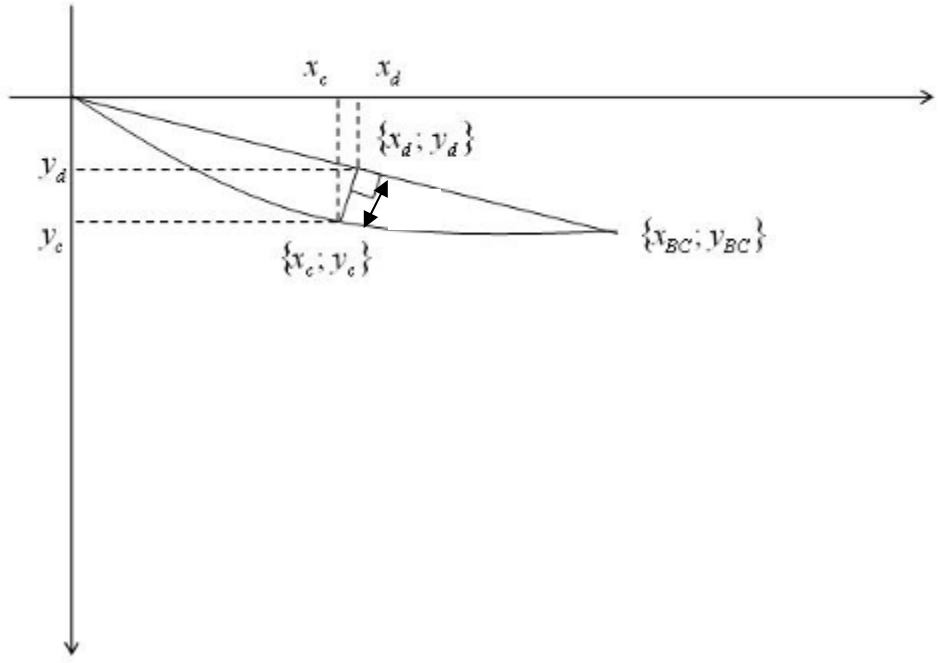


Figure 41 : *position du creux*

$$P = \frac{|y_c - y_d| \cdot \sqrt{y_{BC}^2 + x_{BC}^2}}{x_{BC}}$$

Ces éléments permettent d'avoir la valeur maximale de la flèche de la toile de store. En effet, cette valeur indiquant le point théorique le plus bas du store est modifiée par le comportement du tissu dans le sens trame correspondant au sens de la largeur du store. De plus, le tissu étant élastique, le modèle idéal défini ici ne correspond pas rigoureusement à la pratique.

III.1.B. Disposition de la cellule sur la toile destinée au store camping-car

Cette étude menée dans le cadre de mes recherches préliminaires a été nécessaire afin de définir des critères supplémentaires influant sur les méthodes de développement du composite toile – cellules photovoltaïques souples.
Placés sur le toit du véhicule, les panneaux photovoltaïques augmentent le poids et la prise au vent du camping-car entrainant ainsi une augmentation de consommation de carburant. Poser le système photovoltaïque à plat limite la prise au vent lors du déplacement du véhicule mais aussi les performances de production pour une utilisation au cours de l'année. Il faut donc ajouter un système d'orientation du panneau alourdissant ainsi la totalité de l'installation.
L'utilisation d'un store camping-car permet de cumuler la double fonction de protection solaire et de production d'énergie électrique sur un même accessoire.

III.1.B.a Contraintes dimensionnelles

Le modèle de store choisi pour cette étude est l'Omnistor 8000. La Figure 35 montre qu'à l'origine, le tube d'enroulement à un diamètre extérieur de 67 mm pour un coffre admettant un diamètre maximum de toile roulée de 87 mm. Le store utilisé mesure 4.30 m de largeur et son avancée maximum est conditionnée par la longueur des bras soit 2.5 m.
Positionnée sur le tissu, la cellule entraîne une augmentation notable de l'épaisseur de la toile. L'épaisseur dépend des technologies de lamination utilisées mais aussi du fournisseur de cellules. Les premiers essais ont été effectués avec des cellules Flexcell. L'épaisseur de ces cellules proche de 1.5 mm est supérieure au double de l'épaisseur de la toile (2×0.65 mm).

Lors des premiers essais, pour optimiser la taille des cellules nous avions utilisé un tube d'enroulement de diamètre extérieur de 48 mm.

Ces paramètres permettent d'établir grâce au modèle définissant l'encombrement d'une toile son avancée maximum de 275,6 cm.

Les cellules fournies par Flexcell sont des multiples en longueur de 61 cm. Pour cet essai, la longueur des cellules correspond à un module de 4 unités, soit 244 cm.

Pour définir la position finale de la cellule sur la toile, plusieurs configurations ont été essayées. Tous les essais ont été réalisés de façon progressive afin de ne pas dégrader les cellules ni l'armature du store.

III.1.B.a.i Version 1 du store camping-car

Cette version a été développée après une série de 3 essais préliminaires au cours desquels les différentes étapes de la construction du store (citées ci-dessous) ont été appréhendées :

- Lamination d'un lé ;
- Confection des joncs, des ourlets et assemblage des lés ;

- Montage de la toile sur l'armature du store sans plier la cellule pour éviter de la dégrader.

Les essais préliminaires sont définis dans les paragraphes suivants :

- **Essai 1 (09/2007)**

Dans un premier temps, lors d'un essai le 11 Septembre 2007, seul un lé de toile photovoltaïque a été positionné sur le store. Nous avons réalisé la lamination en statique sur une table sous vide appartenant à l'entreprise Flexcell. Nous avons observé sur les bords de la toile des plis de déformation et de dégradation.

Les essais d'enroulement avec un prototype comportant une cellule sur toute l'avancée du store ont confirmé la pertinence et la précision des calculs issus de nos modèles.



Figure 42 : *Etude du comportement de la toile photovoltaïque (Essai 1)*

Ainsi a-t-il été possible de mettre en évidence que le jonc dans la toile ne doit pas avoir un diamètre supérieur à 3 mm dans le cas où il est confectionné de manière traditionnelle, c'est-à-dire inséré dans l'ourlet. La surépaisseur du laminat empêche l'insertion correcte de la toile et du jonc dans la gorge prévue à cet effet dans la barre de charge et d'enroulement. Autrement, un jonc à lèvre se révèle indispensable. Cette solution a été retenue pour l'assemblage de tous les futurs prototypes de store camping-car.

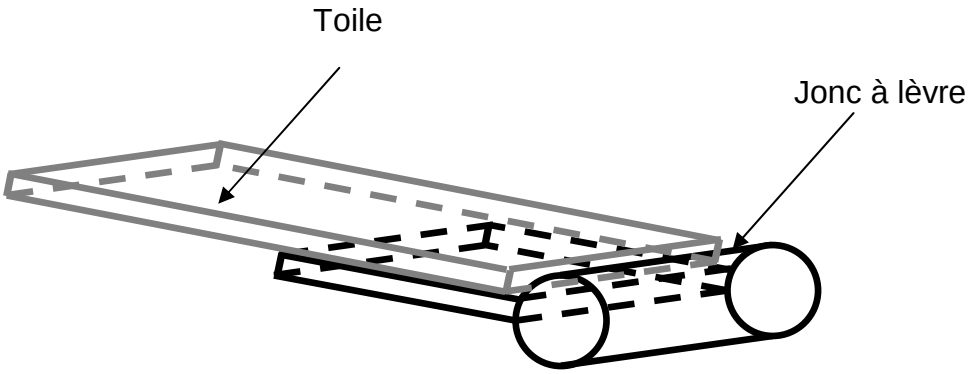


Figure 43 : *Jonc à lèvre inséré assemblé à la toile*

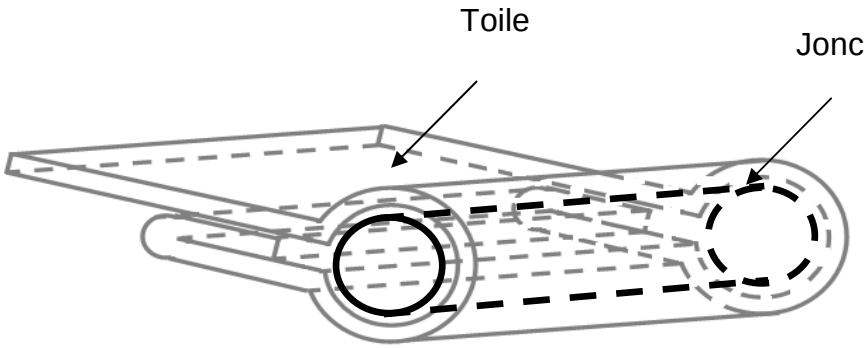


Figure 44 : *Jonc inséré dans un ourlet*

- **Essai 2 (18/10/2007)**

Des corrections ont été apportées sur les joncs pour pouvoir insérer correctement la toile aux points d'attache. Deux lés photovoltaïques non assemblés entre eux sont disposés à chaque extrémité du store. Cela a permis de voir le comportement en tension de la toile et lors de l'enroulement. (Figure 45).



Figure 45 : *Etude du comportement de la toile photovoltaïque (Essai 2)*

- **Essai 3 (11/2007)**

L'Essai 2 a montré que la toile seule a tendance à pocher fortement. La forte rigidité des parties laminées maintient la toile laminée en tension, tandis que le tissu seul moins rigide ne peut être maintenu en tension. Ce phénomène est accru par les déformations entrainées lors du procédé de lamination. Pour annuler ce pochage, les parties de tissu laminées ont été supprimées de façon à ne garder que le laminat. Le laminat a ensuite été confectionné entre 2 parties de toile nue.

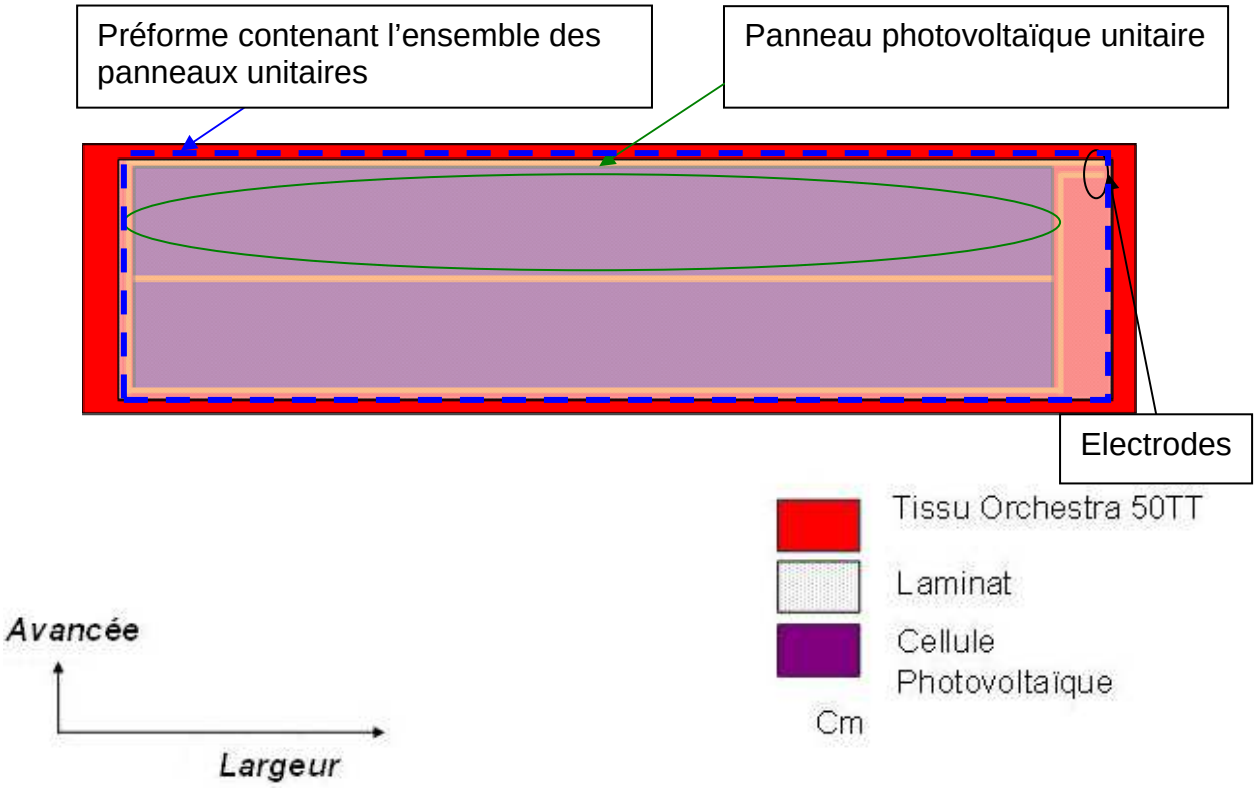


Figure 46 : *Composition de la toile photovoltaïque laminée sans toile confectionnée*

Note : on appelle préforme toute entité fermée comportant un ou plusieurs panneaux photovoltaïques unitaires laminés ensembles (voir Figure 46)



Figure 47 : *Etude du comportement de la toile photovoltaïque confectionnée (Essai 3)*

La connectique

Deux solutions peuvent être retenues pour récupérer l'électricité :

- Dans le tube d'enroulement
- Dans la barre de charge en remontant les câbles le long des bras du store

Bien que la dernière solution soit celle correspondant à la plus grande longueur de câble, donc susceptible d'entraîner le plus de pertes, elle est préférée à la première. En effet, le mouvement de rotation du tube d'enroulement imposerait l'utilisation d'une pièce (permettant le transfert de l'énergie) solidaire d'une pièce en rotation à une autre pièce fixe.
L'énergie produite par la cellule photovoltaïque est donc récupérée dans la barre de charge car il n'y a pas de mouvement de rotation dans cette pièce.
Pour ne pas percer la toile sur le bas du store à un endroit ou la traction du tissu est importante, une languette est découpée lors de la confection et passée derrière le jonc à lèvre qui est fendu à cet effet. Cela n'a aucune influence sur le comportement mécanique du store.

Une autre difficulté concerne le repli des bras lors de l'enroulement du store qui impose des contraintes limites d'épaisseur au niveau de la barre de charge et aussi au niveau de l'épaisseur d'un boîtier de protection de la connexion entre le tissu et le câble. Aucun boîtier conventionnel ne peut être utilisé sans modifier la barre de charge.

Il faut donc soit créer un boîtier de protection personnalisé de la connexion entre la toile et les câbles ou alors modifier la forme de la barre de charge aux endroits où les connexions sont faites. Dans le second cas, un boîtier type sans gêner la fermeture du store devient alors positionnable.

Lors de cet essai, les deux solutions ont été testées sur des éléments séparés du store afin de savoir laquelle est la plus satisfaisante.

Usinage barre de charge

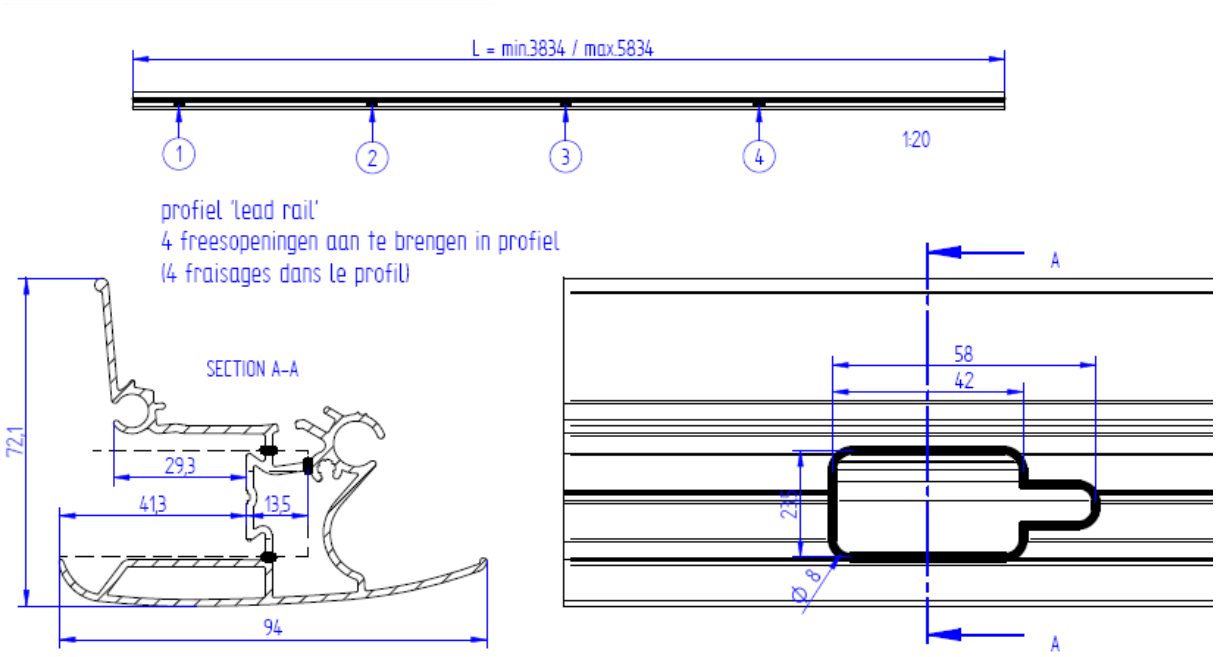
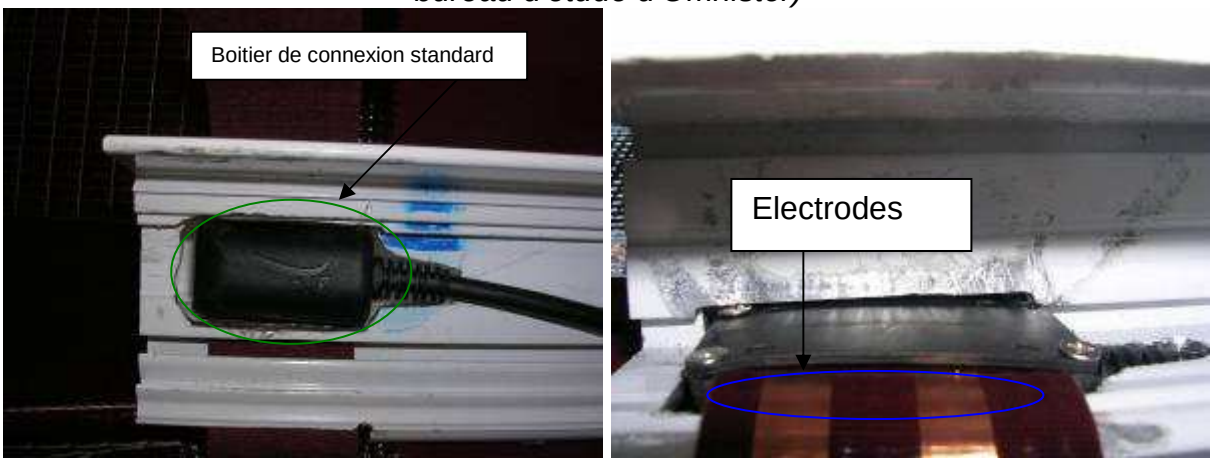


Figure 48 : *Usinage barre de charge (Schéma réalisé en collaboration avec le bureau d'étude d'Omnistor)*



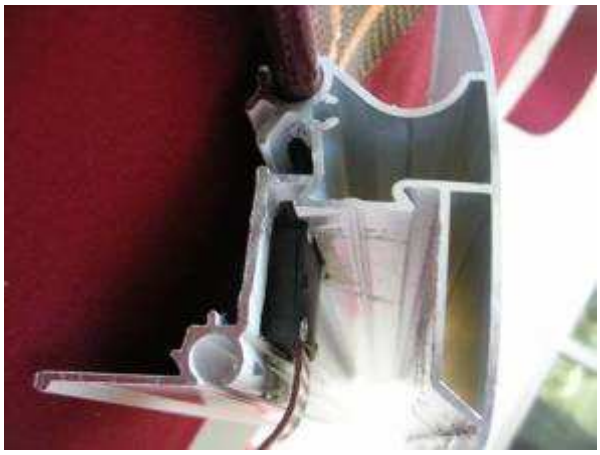


Figure 49 : *Essais d'usinage de la barre de charge*

Fabrication d'un boîtier

Le boîtier doit protéger la connexion des agressions extérieures, être fait d'un matériau isolant électrique, être de faible épaisseur mais de taille suffisante pour contenir la toile, un câble et une diode. La solution retenue est présentée sur la Figure 50.



Figure 50 : *Boîtier de protection de la connectique*

- **Essai 4 (01/2008)**

Les précédents essais ont permis de faire une version du store comportant 4 lés photovoltaïques de 2.44 m de long chacun et de 60 cm de large, séparés entre eux par une bande de tissu. Tous les panneaux sur le store sont branchés entre eux en parallèle. Ainsi la tension nominale du montage est de 15 V. Il serait alors beaucoup plus intéressant en termes de production d'énergie de n'utiliser que des lés photovoltaïques assemblés entre eux. Cependant, le prix du store serait beaucoup trop élevé dans ce cas. La solution de connexion retenue est celle comportant des boîtiers. Moins onéreuse que celle consistant à modifier la barre de charge, elle empêche cependant de mettre des lés photovoltaïques aux endroits où se positionnent les bras repliés lorsque le store est fermé.

Confection

Il existe différentes méthodes de confection pour assembler des lés et faire des ourlets avec des toiles acrylique enduites :

- Couture
- Collage par bande d'apport
- Collage avec colle liquide

La difficulté pour l'utilisation des collages est d'assembler une toile acrylique dont l'une des deux faces est traitée avec des fluorocarbones et l'autre face enduite avec une enduction de type acrylique. La face enduite acrylique ne possède pas une bonne affinité avec les colles ou les bandes d'apports utilisées par les confectionneurs.
Le collage nécessite donc un aménagement sur l'un des bords de la toile du coté de la face enduite. Lors du traitement d'enduction de la toile, on limite le dépôt d'acrylique à 2,5 cm du bord créant ainsi une bande parallèle à la laize du tissu. Cette bande sans enduction est appelée bande de réserve d'enduction. Elle permet ainsi la superposition de 2 parties de toile non-enduites lors de l'assemblage et garantit la pérennité dans le temps de l'assemblage.

N'ayant pas à notre disposition de machines de collage, les premiers essais de confection ont été faits par couture. Le défaut éventuel d'une telle solution est la perte partielle de l'imperméabilité de la toile : les trous faits pour passer l'aiguille augmentent la perméabilité à l'eau.

Le nombre de lés assemblés étant moins important, nous avons décidé de dupliquer le prototype pour tester d'autres solutions de confection. L'un est assemblé par collage avec de la colle liquide, l'autre par couture.

Collage

L'assemblage des différents lés a été effectué par dépose de colle liquéfiée à l'air chaud sur une machine PFAFF.

Nous avons remarqué que l'épaisseur des cellules, et leur fragilité, sont des inconvénients pour réaliser la confection.

De plus, sur ce modèle de machine, la proximité du laminat empêche la jonction des lés. En effet, la rigidité engendre un effet ressort dans les guides de la machine. Le lé central a été le plus difficile à assembler.
La position du chariot coulissant qui supporte la tête de la machine fait obstacle à cause de sa forme coudée. Elle interdit de rouler la toile rigidifiée par le laminat dans le sens trame avec un rayon suffisant pour éviter de dégrader (plier) la cellule. Cette même rigidité du laminat augmente la difficulté de maintenir la toile en positon roulée.

L'utilisation d'autres modèles de machine dont la géométrie est différente pourrait permettre la résolution de ces problèmes.



Figure 51 : *Photo de la machine de confection*

Couture

Lors de l'assemblage par couture, nous n'avons pas eu le problème de place : le coude étant plus haut, la toile a pu être manipulée plus facilement.

Résultat et performances

Le store ainsi conçu a une surface totale de 10,59 m² et une couverture de cellule de 54 % soit 5.8 m². La toile pèse 8.595 Kg. Le rendement des cellules Flexcell lorsque le prototype a été conçu avoisinait les 4 %. La puissance crête d'une telle surface est proche de 232 Wc.

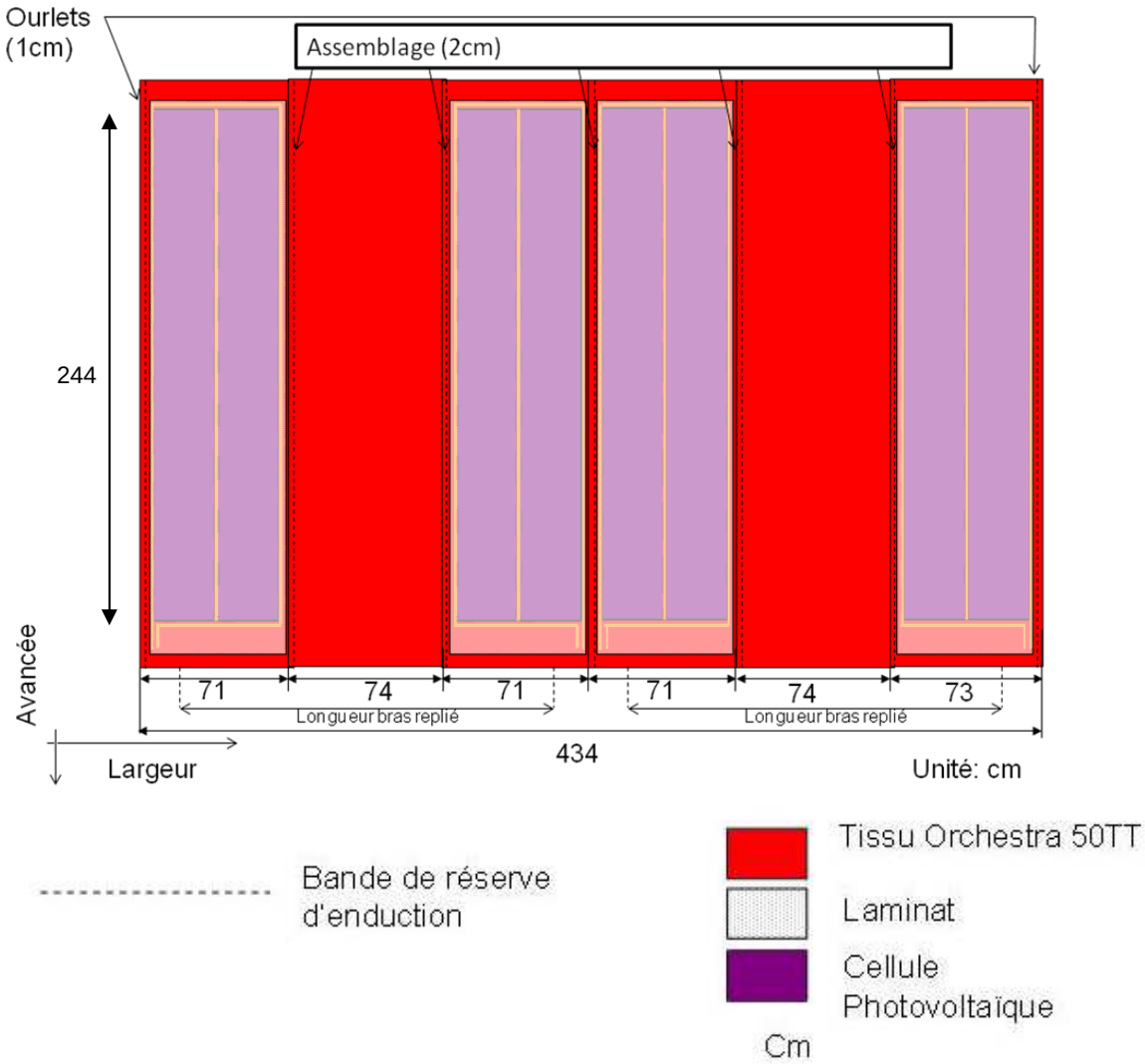


Figure 52 : *Schéma d'un store de camping-car Version 1*



Figure 53 : *Store de camping-car Version 1*

Les mesures sur le store ont été réalisées pour une ouverture de 166 cm et un angle d'inclinaison de 5.8°. La tension mécanique du ress ort est de 100 N pour ce type de store.
Bien que le poids de cette toile soit élevé, le creux maximum théorique de la toile est de 11.7 cm. En pratique, le creux de 7.2 cm se situe à l'extrémité gauche du store et est inferieur à la valeur théorique. Le point le plus bas de la poche se situe à 83 cm de la barre de charge.
Bien que la puissance crête de cette version soit assez élevée, le tube d'enroulement de diamètre 48 mm n'admettant pas de moteur, cette version ne peut être industrialisée. De plus, les lés sans toiles photovoltaïques ayant une épaisseur faible devant celle des lés comportant les cellules, beaucoup de plis se sont formés lors de l'enroulement.

Suite à l'analyse de ces défauts, nous avons imaginé et réalisé une nouvelle version de store photovoltaïque camping-car.

III.1.B.a.ii Version 2 du store camping car

Pour utiliser un tube permettant l'utilisation d'un moteur (diamètre 63 mm au lieu de 48 mm), il est nécessaire de diminuer le diamètre final de la toile enroulée. Les cellules photovoltaïques ont été positionnées plus bas sur le store.
Pour utiliser toute la largeur du store sans que les boîtiers de connexion gênent la fermeture du store, nous avons équipé différemment chacun des trois lés assemblés La position des électrodes sur les lés d'extrémité est proche de l'ourlet, les électrodes du lé central sont au milieu du store.

- **Essai 1 (03/2008) essai de comportement physique**

Cet essai consiste à réaliser le store sans utiliser de cellules fonctionnelles. Cela permet de s'assurer que toute la toile peut être roulée dans le coffre et de parfaire la lamination (décrite au chapitre suivant) et la confection. Le store réalisé est moins large que le précédent (387,5 cm au lieu de 434 cm). Pour éviter toute surprise, l'avancée du store a été prévue pour une valeur supérieure à la valeur théorique calculée : les cellules étant non-fonctionnelles, nous pouvons recommencer le montage si la toile ne rentre pas dans le store. Cette technique permet de constater l'influence de la compression de la toile et de son laminat.

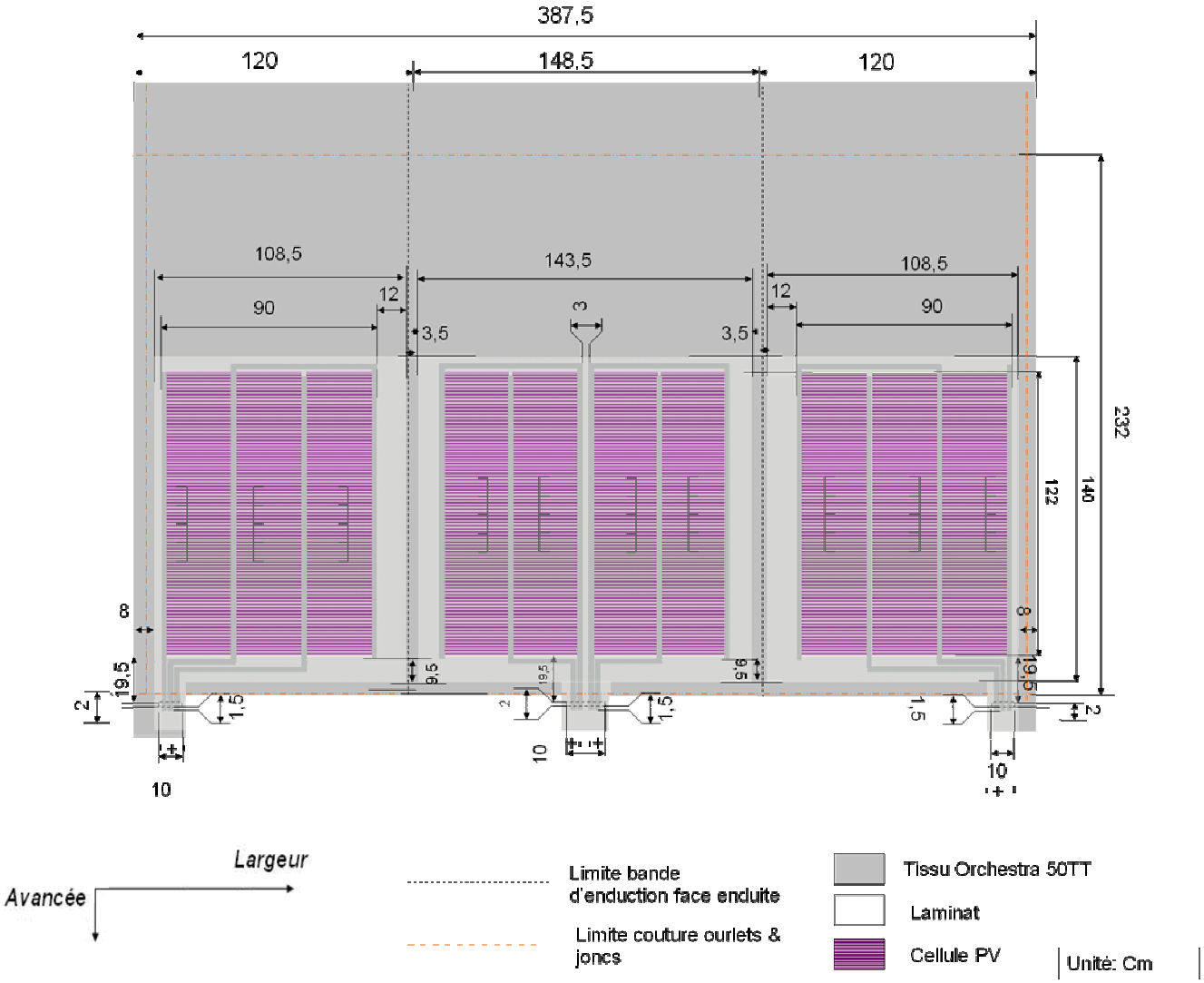


Figure 54 : *Schéma d'un store de camping-car version 2*

La lamination

Le procédé de lamination est identique à celui utilisé lors des essais précédents. Pour éviter de créer des plis sur les parties de toile exempts de laminat lors de la lamination, le tissu a subi un traitement de sanforisage qui optimise sa souplesse.

La confection

La confection a été réalisée par collage avec une bande d'apport sur machine Sinclair. Un chariot coulissant le long d'un rail positionné sur une table permet de réaliser cette confection. De façon inattendue, la confection a été rendue plus difficile par le traitement d'assouplissement de la toile : la rigidité de la toile n'est plus

suffisante pour que les bords de la toile suivent le guide de confection sans être pliés. La toile une fois pliée ne suit plus la trajectoire prévue et les bords des lés ne sont plus parfaitement parallèles entre eux.

Le montage sur l'armature

Une telle avancée sur le store ne permet pas en théorie de rentrer la totalité de la toile confectionnée dans le coffre. En effet, le tissu a une épaisseur simple de 0,65 mm. Sans compression après confection, cette épaisseur avoisine 1,30 mm. La cellule superposée à la toile a une épaisseur de 1,50 mm.

Les parties sans confections (superposition de toile) peuvent être rentrées dans le coffre (diamètre 86,04 mm). La longueur de la toile de 92 cm d'épaisseur 0,65 mm et la longueur du laminat 140 cm d'épaisseur 0,5 mm donnent un diamètre final théorique de 86,04 mm. Cependant, les parties où il y a assemblage, en ayant une épaisseur de 1,30 mm, le diamètre final théorique est de 90,36 mm soit 3,30 mm de toile en plus. Ceci correspond à 1,1 tour en plus de toile assemblée et 1,2 tour en plus de toile confectionnée.
En considérant les parties où on a une superposition de toile, nous ne pourrions rentrer avec de telles valeurs d'épaisseur que 55,9 cm de toile en plus des 140 cm de laminat.

$$l_{toile} = \frac{\pi}{e_{toile}} \left(R_{ext}^2 - \left(\frac{l_{la\,\min\,at} \cdot e_{la\,\min\,at}}{\pi} + R_{\text{int}}^2 \right) \right)$$

Avec :

R_{ext} : rayon du coffre (mm),
R_{int} : rayon du tube d'enroulement (mm),
l_{toile} : longueur de la toile (mm),
e_{toile} : épaisseur de la toile (mm),
$l_{la\,\min\,at}$: longueur du laminat (mm),
$e_{la\,\min\,at}$: épaisseur du laminat (mm).

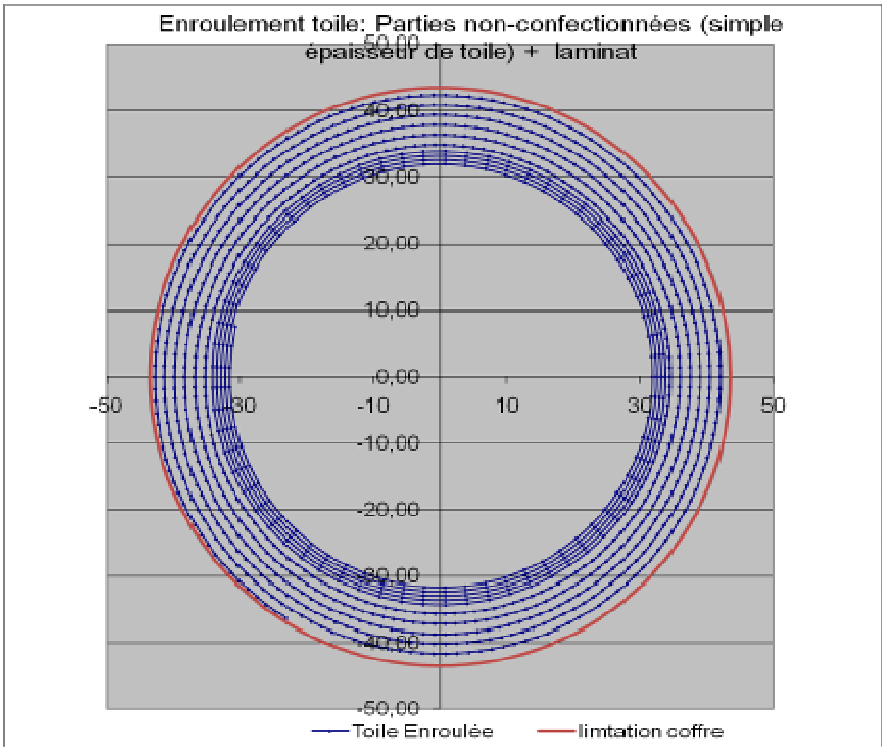


Figure 55 : *Modélisation de la toile de store (parties les plus épaisses de la toile + laminat) dont la constitution est la suivante :*
Epaisseur toile : 0,65 mm épaisseur laminat : 1,5 mm
longueur toile :92 cm / longueur laminat : 140 cm
rayon final calculé : 43,02 mm

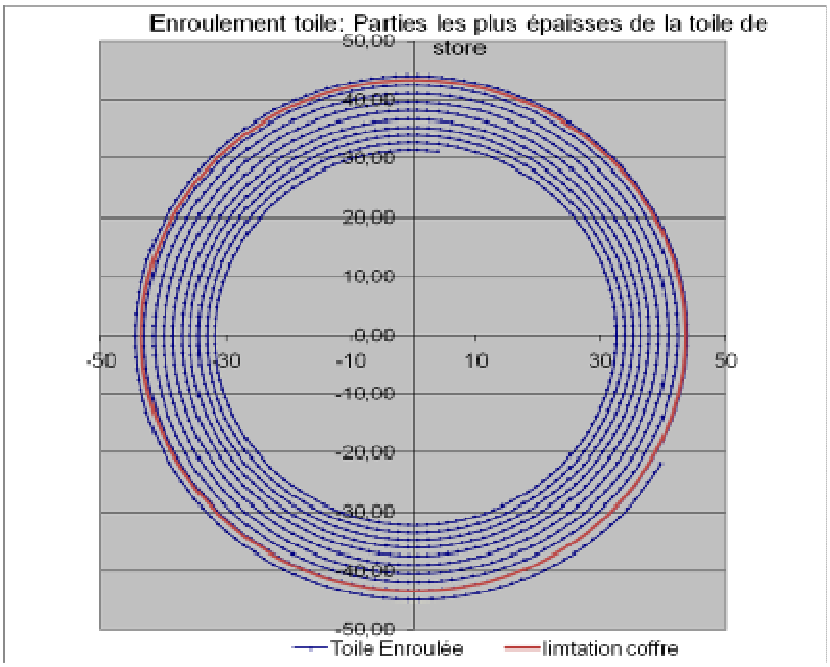


Figure 56 : *Modélisation de la toile de store (parties les plus épaisses de la toile + laminat) dont la constitution est la suivante :*
épaisseur toile : 1,3 mm/épaisseur laminat : 1,5 mm
longueur toile :92 cm / longueur laminat :140 cm
rayon final calculé : 45,18 mm

Nous avons pu ajouter difficilement 92 cm en plus de toile soit 36 cm en plus de la valeur calculée. Le store se ferme, mais avec résistance. En conditions réelles, il est possible que l'épaisseur moyenne de la toile et du laminat soit inférieure à 1,5 mm et que les parties confectionnées ne correspondent pas sur toute la longueur à une double épaisseur de toile. L'enroulement peut contraindre la toile à se compresser ce qui diminuerait encore l'épaisseur. Enfin, le diamètre de la toile peut aussi écarter légèrement le coffre car les parties confectionnées représentent une faible largeur devant celle du store (10 cm sur 387,5 cm de large soit 2,5% de la largeur du store).

La connectique a été réalisée de la manière suivante :

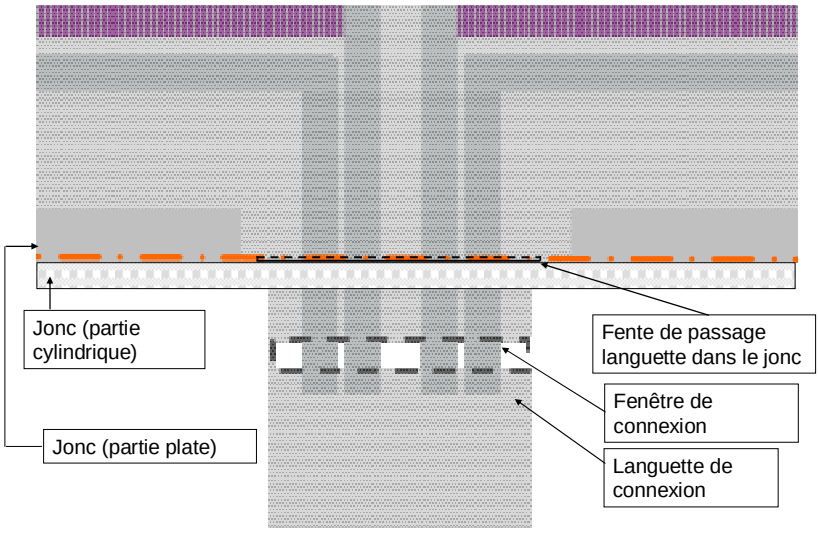


Figure 57: *Passage languette de connexion du lé central dans le jonc*

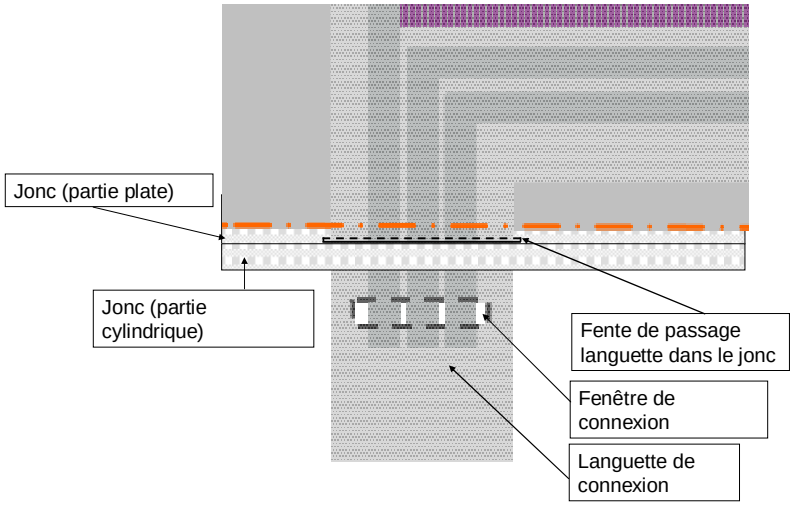


Figure 58 : *Passage languette de connexion du lé de gauche dans le jonc*

- **Essai 2 (04/2008) – Fonctionnement du store**

Le but de cet essai a été de dupliquer le travail précédant avec des cellules fonctionnelles. Les nouvelles dimensions ont été prises en compte pour rentrer plus facilement la toile dans le coffre. Toutes les étapes ont été effectuées de la même façon que lors de l'essai 1.

Performances électriques

Une fois laminées, les cellules ont été testées dans les conditions de tests standards pour s'assurer de leur bon fonctionnement. La surface totale de cellules est de 3,416 m². En comptant 40 Wc/m², nous devrions obtenir 136,4 Wc. Or, la puissance après test de chacune des cellules est de 146,534 Wc soit en moyenne 42,89 Wc/m². On peut supposer que la puissance réelle des cellules photovoltaïques est légèrement plus élevée que la puissance annoncée par le fabricant.

Afin de passer les câbles le long des bras, le nombre de cellules a été divisé en deux groupes (notés A et B sur la

Figure 59) comportant chacune cinq entités de panneaux. Chaque groupe comporte 2 groupes d'électrodes : 3 entités sur les lés latéraux et 2 entités sur le lé central. La division en 2 groupes a été effectuée suivant l'axe central de symétrie du store. Le groupe A est composé des sous groupes 1 et 2 et le groupe B, des sous groupes 3 et 4. Les câbles de chaque sous groupe sont passés dans des goulottes le long des bras.

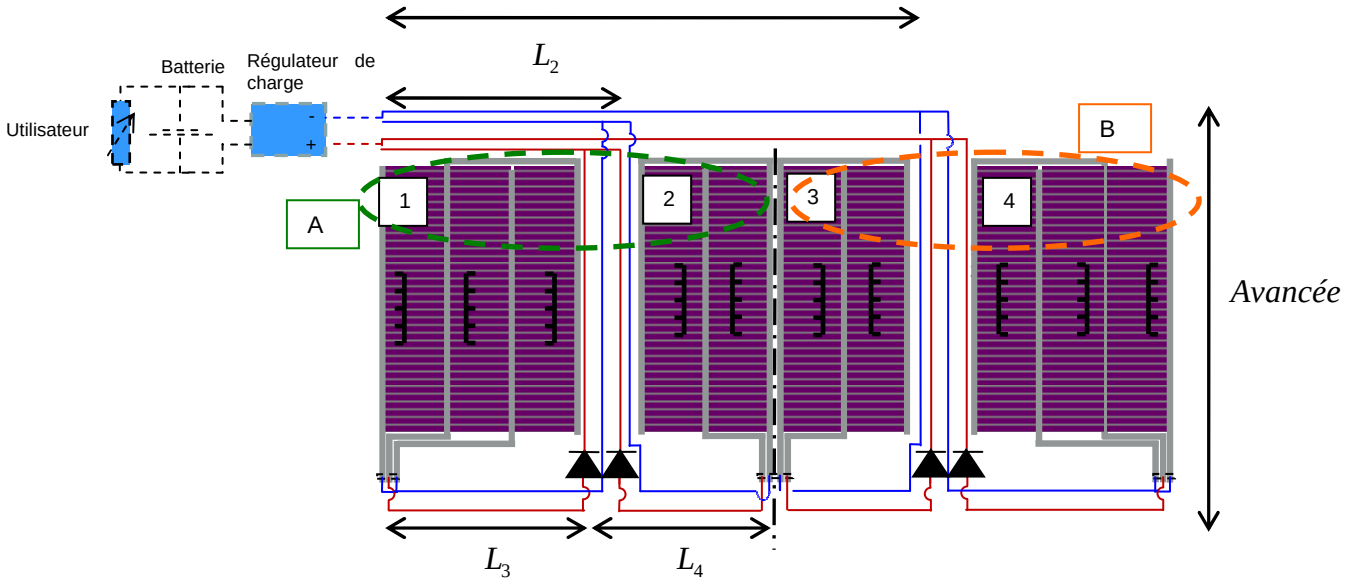


Figure 59 : *Schéma de câblage du store camping-car version 2*

Les valeurs obtenues lors du test après lamination sont les suivantes :

Sun Simulator III - Production version V4.12V
Measure

Panel :	Flexcell
Type :	6_films_parallel
Panel no :	1
Serial no :	71109.1_enc_mod_001
Date :	080401
Ref. cell type :	STANDARD MEAS
Id. number :	MTFP 1354-1
Sensitivity	51.5 mV
Act. temp.:	25.2 C
Result :	00 - Class A

Temp. =	25.0	C
Irrad.=	1.012	kW
Isc =	3.13	A
Voc =	23.58	V
[redacted]		
FF =	62.34	%
MPP =	46.052	W
V@mpp =	18.57	V
I@mpp =	2.48	A
I@vref=	2.77	A
Rser. =	1.072	Ohm

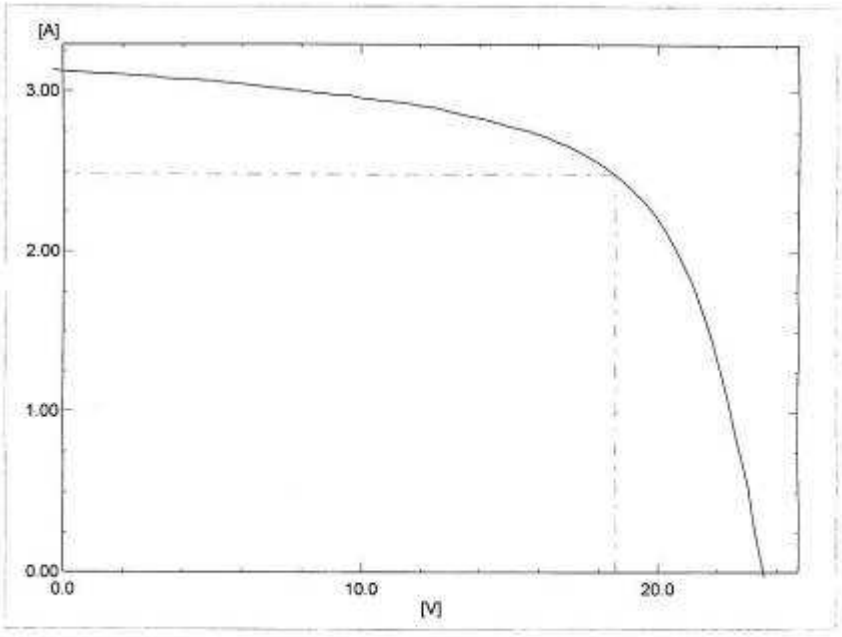


Figure 60 : *Caractéristiques I(U) du groupe de cellules 1*

Sun Simulator III - Production version V4.12V
Measure

Panel :	Flexcell
Type :	6_films_parallel
Panel no :	1
Serial no :	71109.1_enc_mod_002
Date :	080402
Ref. cell type :	STANDARD MEAS
Id. number :	MTFP 1354-1
Sensitivity	51.5 mV
Act. temp.:	23.8 C
Result :	00 - Class A

Temp. =	25.0	C
Irrad.=	1.016	kW
Isc =	3.16	A
Voc =	23.50	V
[illegible]	[illegible]	%
FF =	61.05	%
MPP =	45.405	W
V@mpp =	17.90	V
I@mpp =	2.54	A
I@vref=	2.77	A
Rser. =	1.102	Ohm

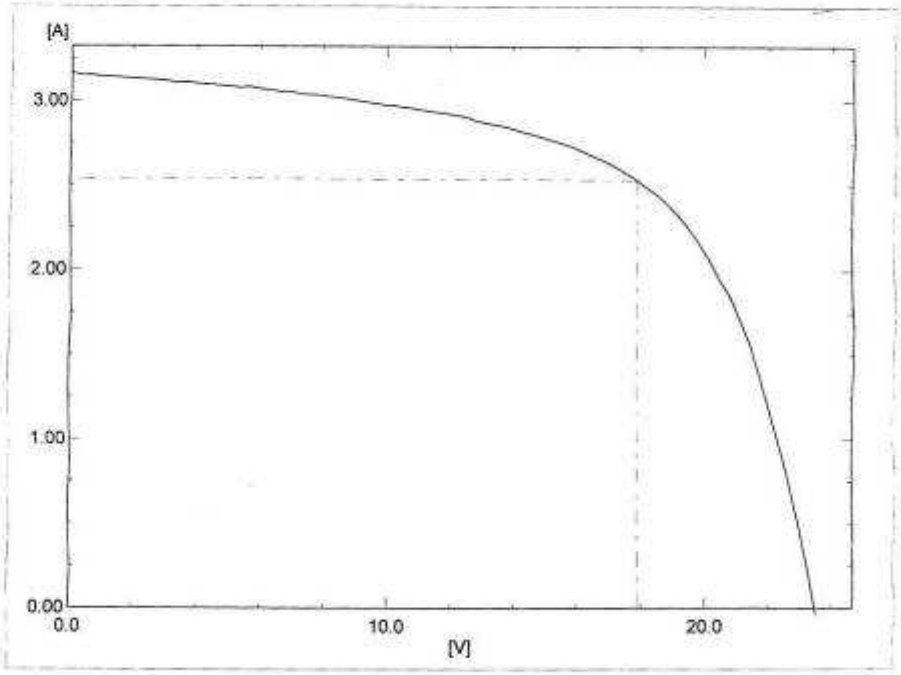


Figure 61 : *Caractéristiques I(U) du groupe de cellules 4*

Sun Simulator III - Production version V4.12V
Measure

Panel :	Flexcell
Type :	INIT_28W
Panel no :	5
Serial no :	70111.1_enc_mod_003
Date :	080402
Ref. cell type :	STANDARD MEAS
Id. number :	MTFP 1354-1
Sensitivity	51.5 mV
Act. temp.:	23.6 C
Result :	00 - Class A

Temp. =	25.0	C
Irrad.=	1.017	kW
Isc =	2.10	A
Voc =	22.69	V
Eff. =	7.61	%
FF =	54.30	%
MPP =	25.691	W
V@mpp =	17.06	V
I@mpp =	1.52	A
I@vref=	1.65	A
Rser. =	1.789	Ohm

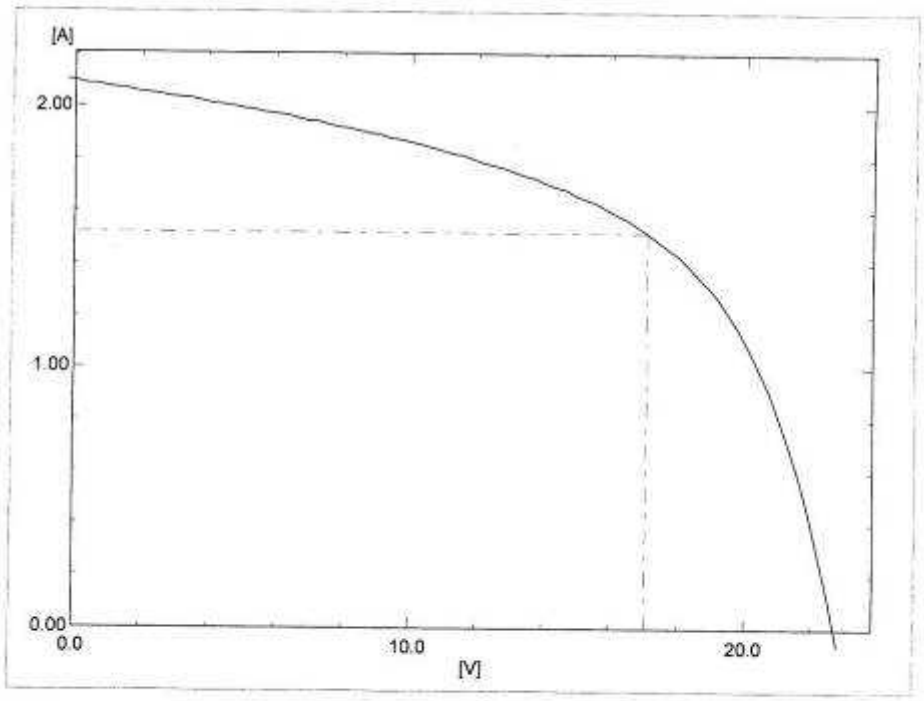


Figure 62 : *Caractéristiques I(U) du groupe de cellules 2*

Sun Simulator III - Production version V4.12V
Measure

Panel :	Flexcell
Type :	INIT_28W
Panel no :	3
Serial no :	70111.1_enc_mod_004
Date :	080402
Ref. cell type :	STANDARD MEAS
Id. number :	MTFP 1354-1
Sensitivity	51.5 mV
Act. temp.:	23.6 C
Result :	00 - Class A

Temp. =	25.0	C
Irrad.=	1.017	kW
Isc =	2.12	A
Voc =	23.00	V
Eff. =	8.58	%
FF =	59.95	%
MPP =	29.186	W
V@mpp =	18.00	V
I@mpp =	1.62	A
I@vref=	1.81	A
Rser. =	1.612	Ohm

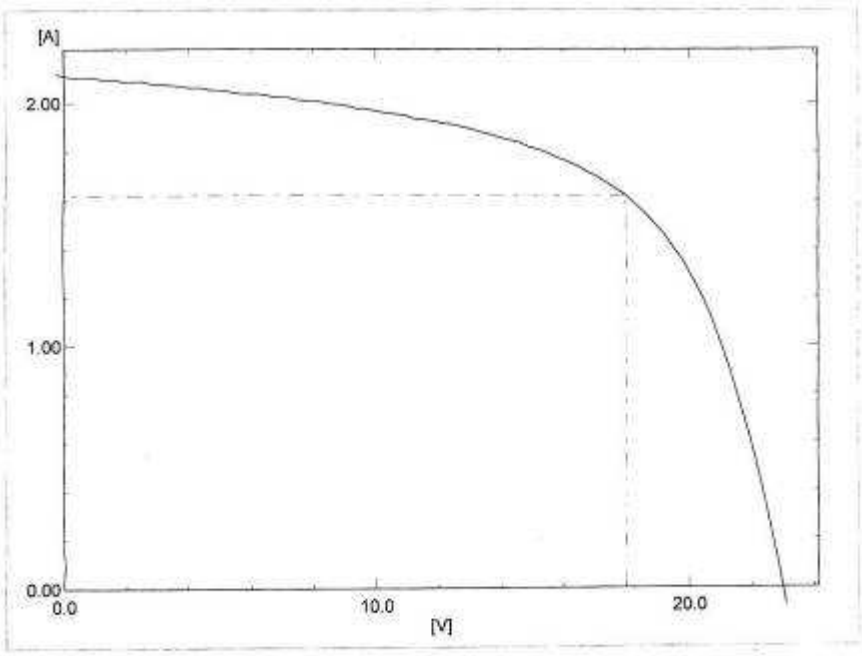


Figure 63 : *Caractéristiques I(U) du groupe de cellules 3*

Dimensionnement des câbles

Pour éviter de trop fortes pertes, les câbles utilisés sont dimensionnés de manière à avoir une section proportionnelle à la longueur et au courant les traversant.

La valeur de la chute de tension enregistrée ne doit pas excéder 3% et si possible 1% (valeur idéale préconisée). La section minimale peut-être calculée ainsi :

$$S = \frac{\rho \cdot l}{R}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{V_{CO}} = \frac{V_{CO} - V_2}{V_{CO}}$$

$$S = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l \cdot I}{\varepsilon \cdot V_{CO}}$$

Avec :

ΔU : différence de tension (V) ($\Delta U = V_{MPP} - V$),
ε : pourcentage de perte de tension (%),
V_{CO} : tension de circuit ouvert (V),
V_2 : tension aux bornes du régulateur de charge (V),
I : intensité (A) ($I = 1{,}25 \times I_{CC}$),
I_{CC} : intensité de court circuit (A),
R : résistance du conducteur (Ω),
ρ : résistivité du matériau ($\Omega \cdot m$),
l : longueur du conducteur (m),
S : section du conducteur (m²).

Seules les longueurs du bras et la distance entre les électrodes de la cellule et le bras sont prises en compte dans ce calcul. En effet, un câble d'une section différente est utilisé pour les longueurs L_1 et L_2 (Fig.).

$$l = Avancée + L_3 = 2.5 + 0.96 = 3.46m$$

De la même manière, la valeur de courant référence est celle pour laquelle le courant de court-circuit est le plus élevé.

$$Icc = 3.16\,A$$

Les câbles étant en cuivre, la valeur de ρ (résistivité) sélectionnée est de $1{,}72 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$ pour une température de 20°C [72].

De tels paramètres nous obligent à prendre des câbles dont les conducteurs ont une section minimale de 0,92 mm². La gorge dans les bras ne permet pas de passer des câbles bipolaires d'une telle section. Nous avons dû lors de cet essai utiliser des câbles de section 0,51 mm² et accepter 5,3% de chute de tension.

Cela aurait pu être corrigé en groupant les cellules et en utilisant des câbles unipolaires. En effet, cela permet de passer moins de câbles mais de section plus importante. De plus, le guide UTE C15-712 [71] référant pour des applications connectées au réseau recommande des câbles de type unipolaire C2 (non propagateur de la flamme), choisis parmi ceux ayant une température admissible sur l'âme d'au moins 90 °C en régime permanent. Il est recommandé que les câbles soumis directement au rayonnement solaire répondent à la condition d'influence

externe AN3 (résistant aux rayons ultra-violets). Toutefois, la résistance à la condition d'influence externe AN3 pourra être réalisée par installation (interposition d'écran,…). Les connexions et les câbles doivent être mis en œuvre de manière à éviter toute détérioration due aux effets du vent et de la glace.

De plus, ce même guide recommande une utilisation, pour les parties électriques transportant du courant continu, de câbles monoconducteurs d'isolement équivalent à la classe II. Ces câbles doivent cheminer côte à côte. Ceci afin de réduire au maximum le risque de défaut à la terre ou de court-circuit. La Figure 64 montre les modifications à réaliser pour répondre aux exigences décrites.

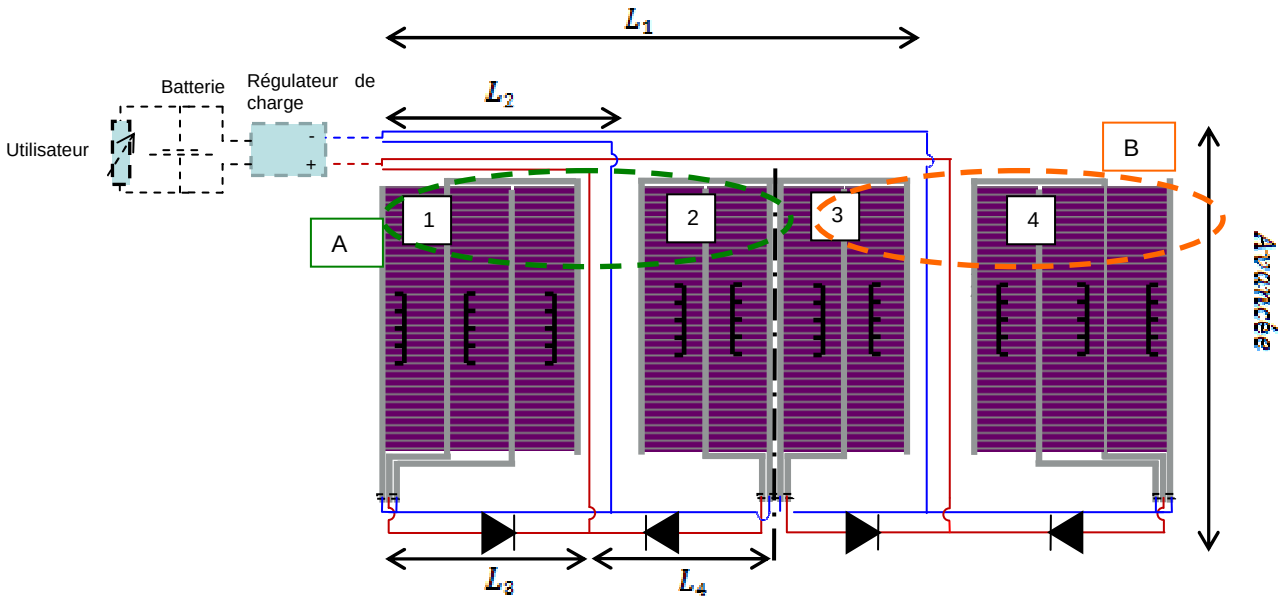


Figure 64 : *Amélioration du schéma de câblage du store camping-car version 2*

Le courant référant est celui dont la valeur est supérieure aux autres groupes.

$$I_{ccA} = 1.25 \cdot (I_{cc1} + I_{cc2}) \text{ ou } I_{ccB} = 1.25 \cdot (I_{cc3} + I_{cc4})$$

Avec

I_{ccA} : somme des courants de court-circuit des panneaux composant les sous groupes 1 et 2.
I_{ccB} : somme des courants de court-circuit des panneaux composant les sous groupes 3 et 4.

Ainsi, la section maximale obtenue est de 1,54 mm² par conducteur.

La protection d'un déséquilibre du branchement série a été réalisée par des diodes Schottcky de marque WTE modèle SB 340 dont la tension de polarisation inverse est de 40 V. Le courant nominal des cellules étant au maximum de 2,58 A, la diode utilisée est correcte (3 A). Une alternative consisterait à utiliser le modèle SB 350 dont la tension est de 50 V correspondant au plus prés à la spécification du guide

rédigé par l'ADEME et le Syndicat des Energies Renouvelables «Spécifications Techniques relatives à la protection des personnes et des biens dans les installations photovoltaïques raccordées au réseau » [24]. Il y est spécifié que la tension de polarisation en inverse des diodes doit être au moins égale à deux fois la tension en circuit ouvert ($2 \times V_{CO}$) soit 47,16 V. L'inconvénient est que la chute de tension d'une telle diode s'élève à 0,75 V contre 0,5 V pour le modèle SB 340.

La diode ainsi dimensionnée et positionnée peut aussi être utilisée comme diode anti-retour pour éviter que la batterie se décharge lorsque la cellule est dans l'obscurité et qu'elle fonctionne en générateur.

- **Version 2 bis (06/2008)**

Ce store a été dupliqué avec des cellules de marque Power FilmSolar dont l'épaisseur plus faible permet de mieux rentrer dans le coffre du store. L'épaisseur du laminat est proche de 1mm. Pour une longueur de 140 cm de toile laminée, 92 cm de toile et un diamètre de tube d'enroulement de 63 mm, le diamètre final de la toile de store pour les parties les plus épaisses (ourlets ou assemblages et laminats) est égal à 85,28 cm.

Comportement mécanique du store

Le lé central de laize et de poids supérieurs (152 cm de laize pour un poids de 2,4 kg) aux lés latéraux de la toile du store (120 cm de laize pour un poids de 1,2 kg) forme une poche. Ce surpoids qui n'est pas compensé par la tension mécanique ni par la rigidité insuffisante de la toile du store entraîne des plis de la toile lors de l'enroulement. Les assemblages des lés sont espacés d'une largeur supérieure à la largeur conventionnelle (150 cm au lieu de 120 cm). Il faut noter aussi que le modèle pour connaître la position et la taille du creux de la toile ne peut pas être utilisé de façon précise dans ce cas : la masse linéique de l'ensemble (composé de la toile et du laminat ne recouvrant qu'une partie de la toile) n'est pas homogène.



Figure 65 : *Store camping-car version 2*



Figure 66 : *Plis du store camping-car lors de l'enroulement*

- **Version 3 (01/2009)**

Les observations précédentes conduisent à préconiser des lés de tailles standards et des dispositions de cellules identiques. C'est dans cet esprit que le design des stores a été modifié.

Comme pour les versions antérieures, deux fournisseurs sont susceptibles de répondre aux contraintes définies pour le développement du store de camping-car.

Les essais ont tout d'abord été réalisés avec des cellules de marque PowerFilm Solar®.

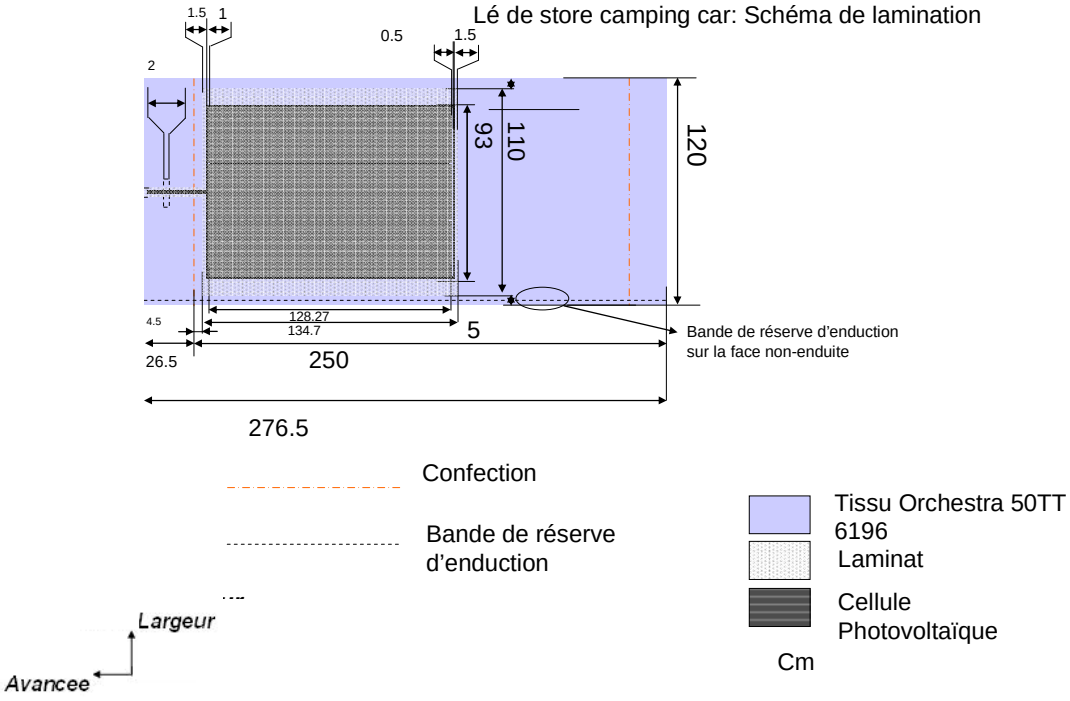


Figure 67 : *Lé unitaire d'un store camping-car version 3*

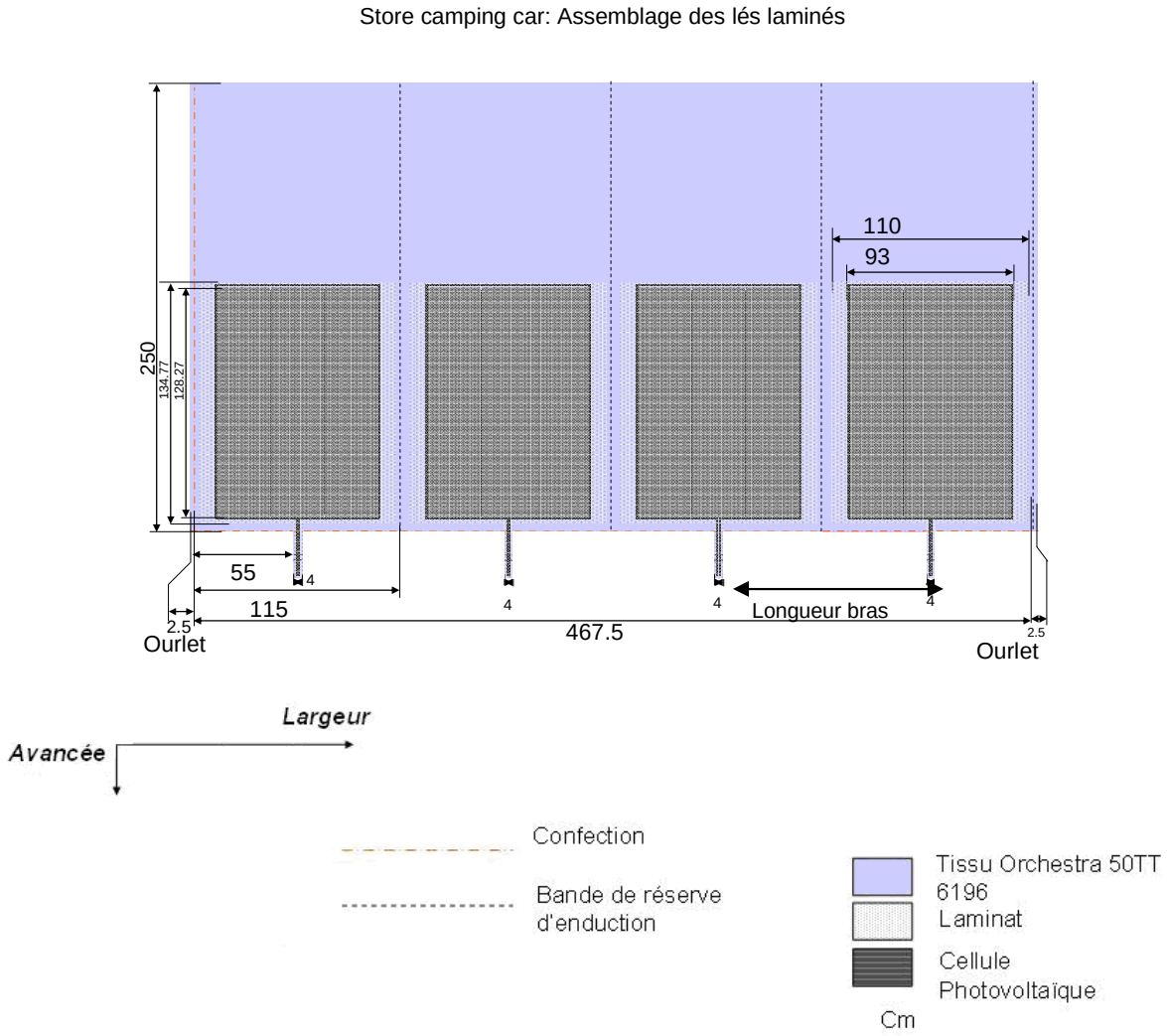


Figure 68 : *Schéma de principe d'un store camping-car version 3 comportant 4 lés*

Les étapes d'assemblage de ce store et de lamination ont été réalisées de façon identique aux stores précédents. Les lés ont été assemblés entre eux par collage.
Les bras une fois repliés doivent avoir une longueur limitée par les deux languettes de connexion placées au centre de la largeur de la toile.
C'est-à-dire, pour un tissu de laize L_{Tissu} (mm) assemblé au lé voisin de même largeur et de recouvrement $L_{Assemblage}$, avec une largeur de boîtier de connexion $L_{Boîtier}$ (mm), la longueur du bras l_{Bras} est alors égale à $l_{Bras} = 2 \cdot \left(L_{Tissu} - L_{Assemblage} - L_{Boîtier}\right)$.
Dans le cas présent, avec des boîtiers de 60 mm de large et des lés de laize 1200 mm dont la largeur de recouvrement lors de l'assemblage est de 25 mm, on obtient une longueur totale de bras de 2230 mm. Ce qui signifie que l'avancée du store est limitée par ces valeurs.
Nous pourrions utiliser des lés de taille supérieure pour augmenter l'avancée mais dans les versions antérieures, les lés de laize supérieure à 120 cm sont soumis de manière plus importante à l'action de leur propre poids impactant ainsi le comportement mécanique et l'esthétisme du store.

Performances électriques

Chaque panneau laminé sur un lé a une surface de 1,11 m². PowerFilm Solar® annonce une puissance crête de 40 W_p/m^2 ce qui correspond à 44.54 W_p par lé. Un store photovoltaïque de quatre lés à une puissance crête de 178,176 W_c. Les performances des cellules PowerFilm Solar® n'ont pas pu être déterminées directement par l'entreprise car elles ne possèdent pas d'équipements spécifiques pour ces tests. Nous avons donc déterminé ces performances avec les cellules intégrées au store en conditions réelles de fonctionnement, mais sans application stricte des normes de mesure.

Les panneaux photovoltaïques sont connectés entre eux en parallèle afin que la tension du système soit celle correspondant à la charge de la batterie soit 14,7 V, en fonctionnement nominal. Les cellules ont une tension de 15 V et une tension de circuit ouvert de 19 V.

Pour des raisons liées à des présentations sur des salons de véhicules de petites tailles, cette version de store n'a été réalisée qu'en trois lés, soit une puissance crête annoncée de 133,62 W_c.



Figure 69 : *Store camping-car version 3 constitué de 3 lés*

Comportement mécanique

Des plis se forment de façon symétrique sur les parties gauche et droite du store. Les bords du store sont très tendus, un pli traverse la diagonale des lés aux extrémités du store. Le creux de la toile se situe donc au milieu de l'ensemble. Le poids d'un lé est de 1.6 Kg. Le poids n'est pas réparti de façon homogène, la différence de rigidité des parties de la toile laminée et non laminée. Il est normal que des plis se forment sur le tissu.

III.1.B.a.iii Version finale 1

La version finale du store est réalisée avec une cellule de marque Flexcell. La différence notable avec la version «PowerFilm Solar®» de même génération est l'utilisation de deux cellules connectées entre elle en série dans la même préforme

au lieu de trois. Les cellules Flexcell ont une largeur de 46,8 cm et la tension pour le fonctionnement en puissance maximale V_{MPP} est de 23 V et la tension circuit ouvert V_{CO} de 32 V. Ceci permet d'utiliser toute la largeur disponible de la toile et compenser ainsi la diminution de la longueur de cellule. Afin que les bords puissent avoir un ourlet correspondant au repli de la toile sur lui-même dans le sens parallèle à l'avancée, nous sommes forcés d'avoir un lé dont la taille du laminat est différente pour éviter un chevauchement du laminat sur l'ourlet. (Figure 71)

Le poids d'un lé avoisine 1.3 kg/m²

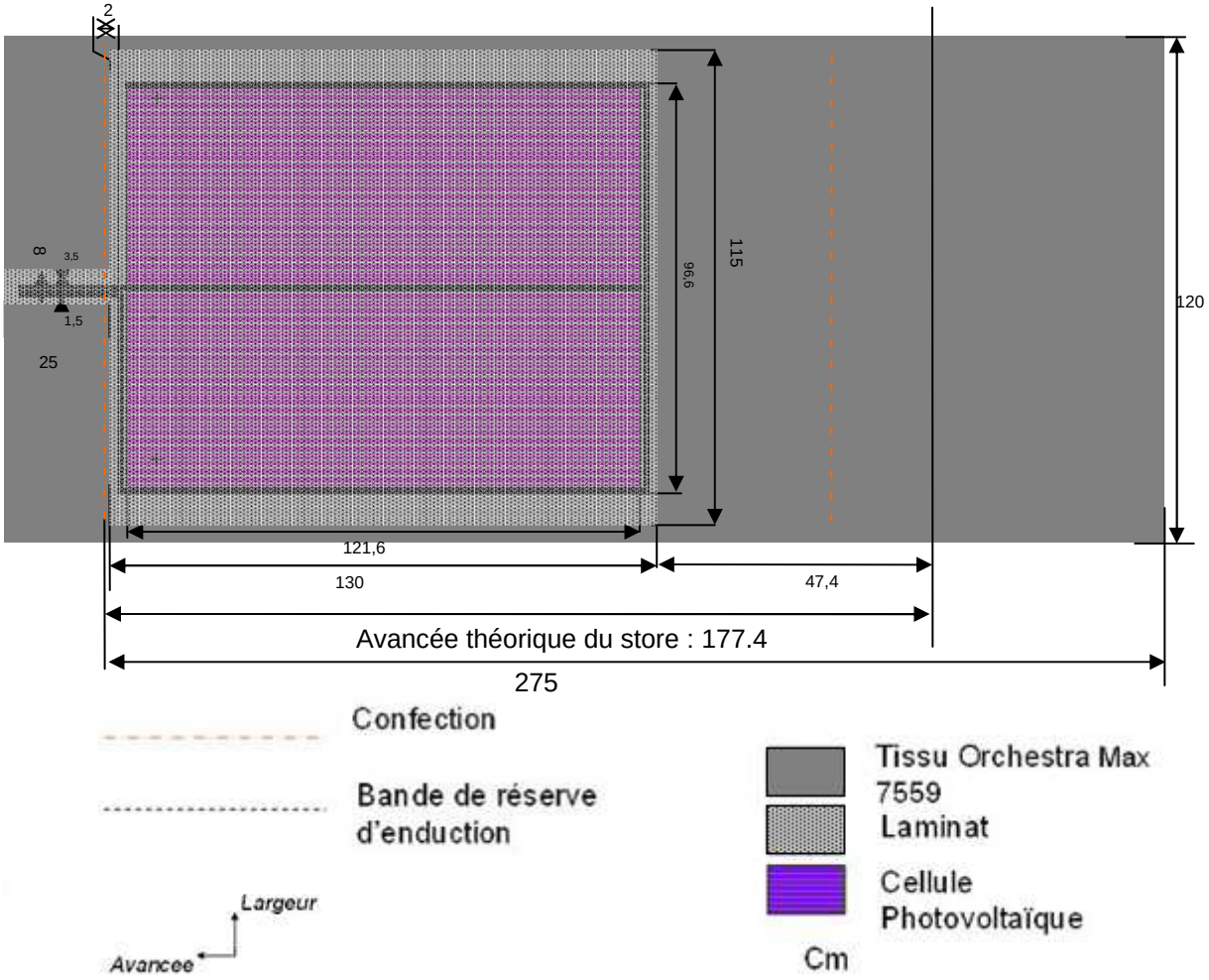


Figure 70 : *Lé central du store*

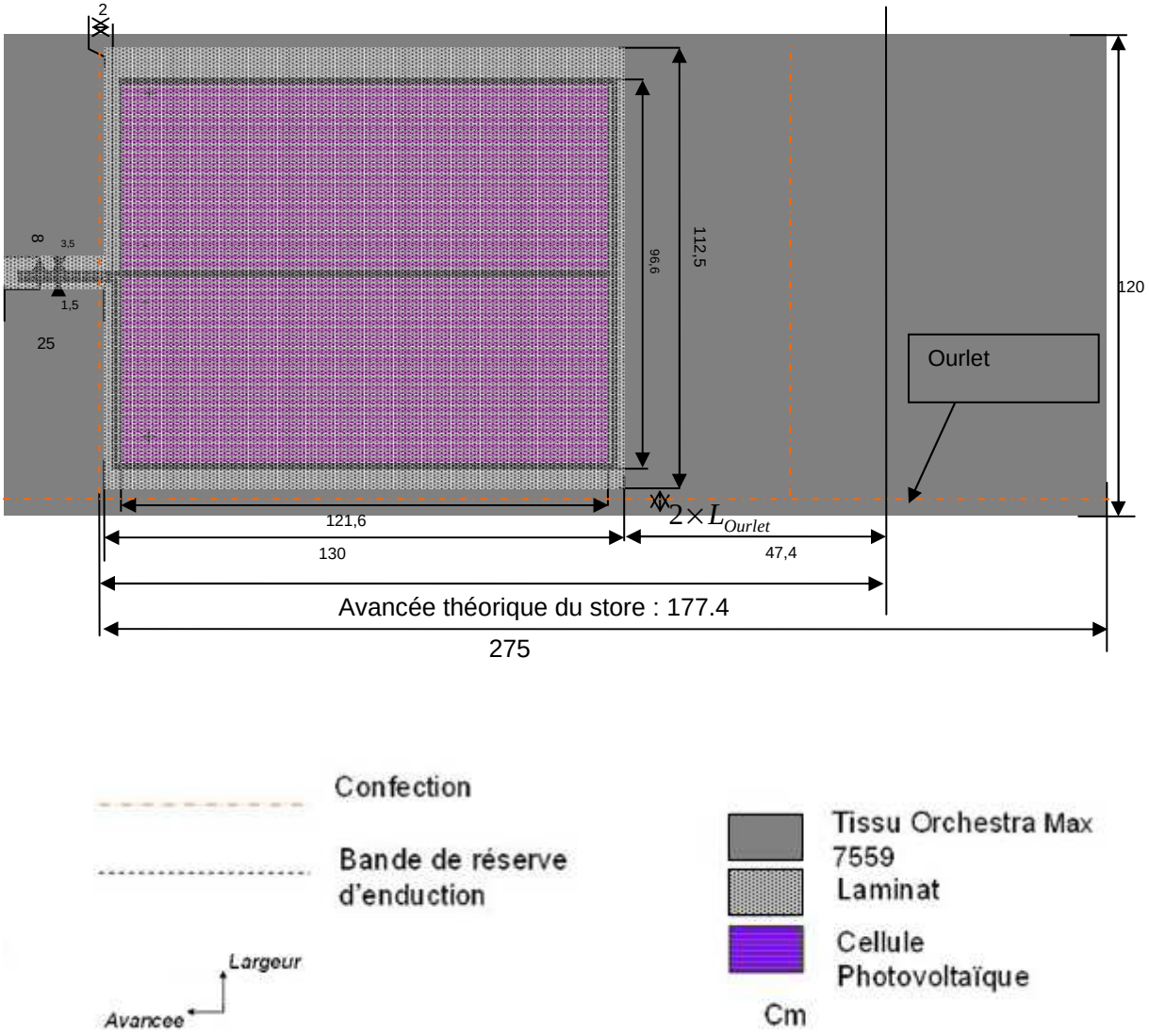


Figure 71 : *Lé latéral droit. Le lé latéral gauche est obtenu par symétrie par rapport à l'axe central de la largeur du lé.*

La Figure 72 représente la caractéristique I(V) d'un lé photovoltaïque ainsi que ses performances électriques.

Il est donc possible de charger deux batteries en série avec ce modèle de store. La surface de cellule permet d'obtenir une puissance de 57 W_c par lé. Ainsi, un store composé de quatre lés permettra d'avoir une puissance de 228 Wc.

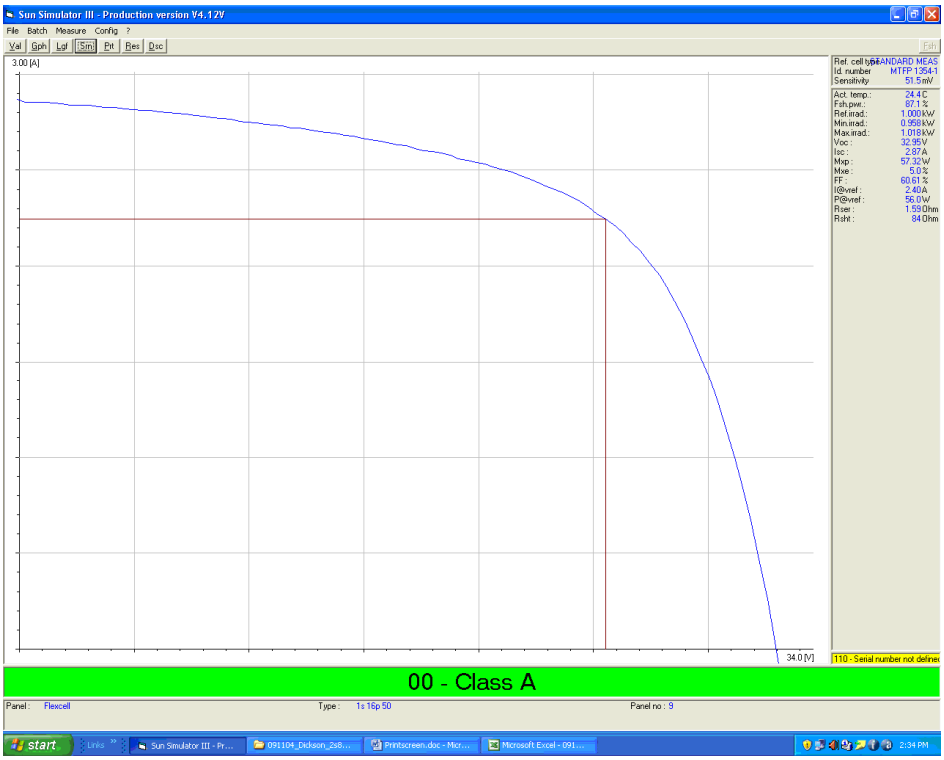


Figure 72 : *Caractéristique I(U) d'un panneau photovoltaïque de surface 1.13 m²*

Toutefois, ce modèle réalisé avec un procédé de lamination différent qui confère une épaisseur de laminat de 1.7 mm ne permet pas de rentrer la totalité de la toile dans le coffre en conservant une avancée supérieure à 2 m. En effet, de manière théorique, on s'aperçoit que la longueur de toile pour de telles épaisseurs sans compter les facteurs de réductions que sont les compressions et écartements du coffre ne nous permettent pas de rentrer plus de 47,4 cm. De plus, le coût final du produit avec une telle surface de cellule est supérieur au coût acceptable. La solution trouvée pour atténuer ces contraintes est de réduire la longueur de la cellule.

III.1.B.a.iv Version finale 2

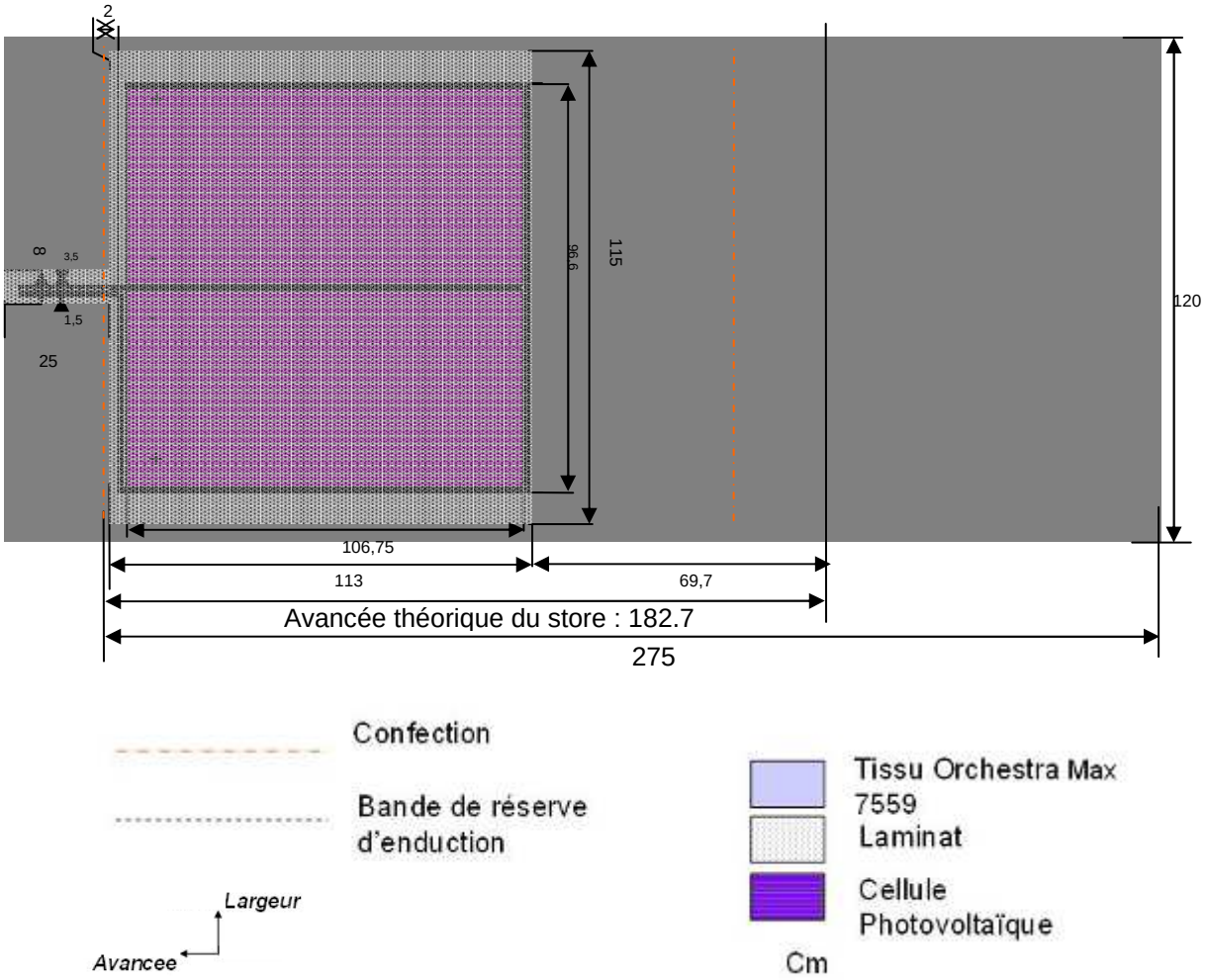


Figure 73 : *Lé central du store*

Cette configuration permet de rentrer 69.7 cm supplémentaires de toile non laminée et atteindre ainsi une avancée totale de 182.7 cm théoriques sans compter le tour mort. L'avancée visible est donc de 162 cm ce qui semble tout de même un peu court. Le gain de longueur par rapport à l'essai précédent n'est que de 3 %.

Il manque donc 90 cm pour que l'avancée du store soit celle attendue. Ceci peut être corrigé par la compression du tissu lors de l'enroulement mais surtout par les réductions d'épaisseur des laminations et des assemblages des lés.

De la même manière que pour l'essai précédent, les lés latéraux doivent être différents des autres lés pour éviter les problèmes des différences d'épaisseur sur une même largeur.

- **Performances électriques**

Une telle surface doit théoriquement produire 49,95 W_c ce qui engendre une perte de 12,3% en comparaison avec la surface précédente.

- **Analyse finale du produit**

Pour des raisons de comportement mécanique et de gain de performances électriques, il serait certainement préférable d'utiliser toute la surface de toile disponible. Utiliser un unique matériau sur une surface est préférable à l'utilisation de deux matériaux d'épaisseur et rigidité différentes. En effet, recouvrir de cellules dans son laminat la totalité de la surface de la toile permet d'éviter les différences d'épaisseurs entre les différentes matières (toile nue/laminat/confection). Nous avons limité les différences de comportement en évitant les alternances sur une même largeur du store. Cependant, pour un recouvrement total, les contraintes dimensionnelles de l'enroulement de la toile ainsi complexée force à modifier le coffre du store pour en augmenter la taille. Ceci entraîne une modification du prix du store qui s'additionne au coût de la cellule photovoltaïque. De plus, recouvrir la totalité du store permettrait aussi d'utiliser le tube d'enroulement pour récupérer l'énergie électrique produite par les cellules. Cela diminuerait les pertes dues à la section des câbles dont les rainures dans les bras ne sont pas adaptées.

III.1.C. Disposition de la cellule sur toile destinée au store résidentiel

Cette application permet de produire de l'électricité tout en apportant aux occupants des pièces un confort thermique. La production électrique revendue au réseau permet de faire un retour sur investissement sachant que les tarifs de revente aux distributeurs sont supérieurs aux tarifs d'achat d'énergie électrique.

III.1.C.a Contraintes dimensionnelles

Les stores résidentiels ont généralement pour une même largeur un volume d'encombrement plus grand que les stores camping-cars. La surface caractérisant cet encombrement pour un store camping-car type Omnistor 8000 est de 28,2 cm². Les stores choisis pour réaliser les prototypes sont des modèles hauts de gammes de marque Matest et Harol dont les surfaces d'encombrements sont respectivement : 54,34 cm² et 60,15 cm². Le premier modèle a un tube d'enroulement de diamètre 75 mm tandis que le second 85 mm. Le diamètre du coffre pour le modèle Matest atteint 112 mm et celui du store Harol 122 mm. Ceci permet de recouvrir la toile de store totalement sans pour autant trop diminuer l'avancée. Comme pour les stores camping-car, les lés latéraux comportant des ourlets doivent être différents pour éviter les surépaisseurs du laminat sur les ourlets.

III.1.C.b Contraintes électriques

Cette application doit pouvoir être raccordée au réseau électrique pour revendre la totalité de la production de l'énergie produite au distributeur électrique. Pour cela, il faut que la surface de cellule soit la plus grande possible afin de pouvoir concurrencer les installations classiques sachant que la technologie utilisée a un rendement brut moins fort que celui des cellules cristallines (4% contre 16 %).

III.1.C.c Contraintes mécaniques

Les mêmes observations que celles faites sur le produit store de camping-car peuvent être faites. La tension des bras étant plus forte (330N contre 50N dans chaque bras), la tension de la toile et l'enroulement devraient être mieux que sur le produit précédent. De plus, comme précédemment, il faut éviter les alternances de doubles et simples épaisseurs sur la même largeur du store. Ceci permet d'éviter les plis sur la toile.

III.1.C.d Contraintes économiques

Le store ne doit pas être trop onéreux afin que le retour sur l'investissement de l'achat soit rentable. Il faut donc voir si cette contrainte n'est pas trop importante et ne diminuera pas la surface de la cellule photovoltaïque.

III.1.C.e Conception du produit

III.1.C.e.i Les différents essais

Dans un premier temps, le store photovoltaïque résidentiel a été réalisé en petite dimension avec l'armature Matest de largeur de 2,4 m.

Réalisé avec une cellule PowerFilm Solar® dont l'épaisseur est proche de 1 mm, il aurait théoriquement été possible de faire une avancée de 5,434 m.

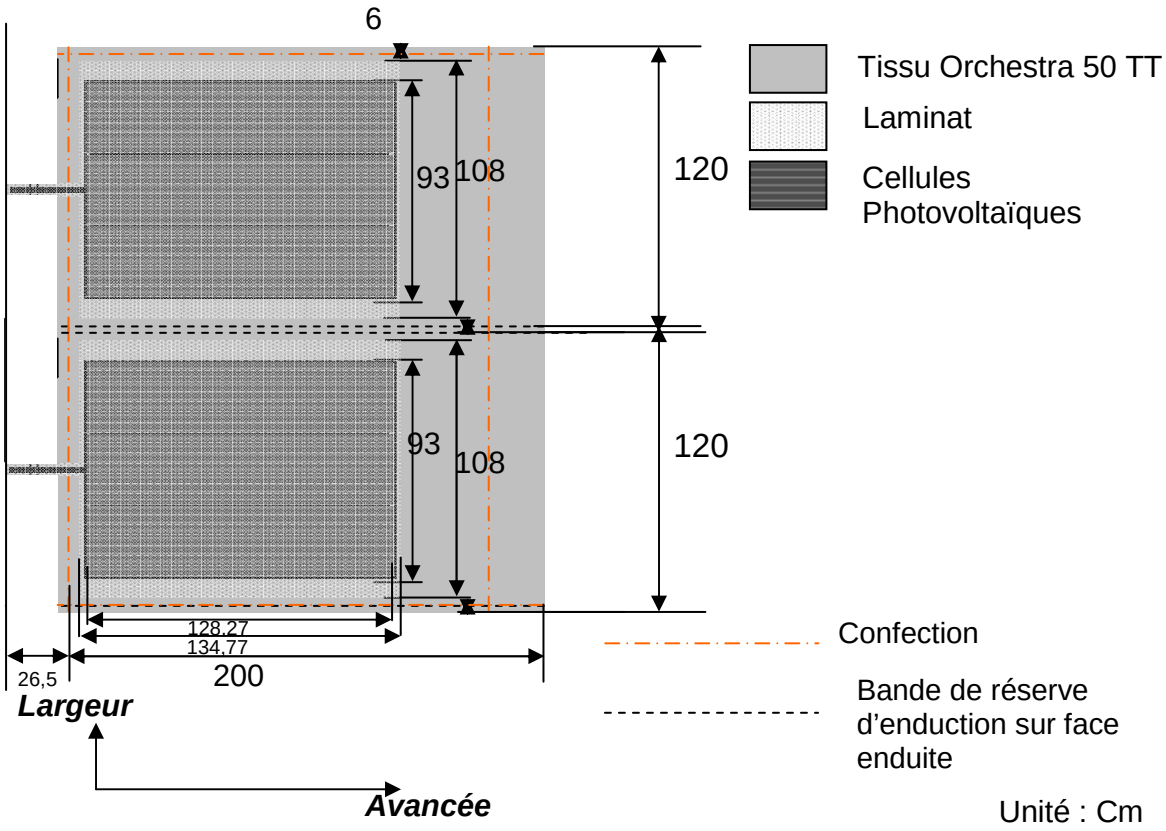


Figure 74 : *Toile de store photovoltaïque comportant 2 lés*

- **Performances électriques**

Le store est constitué de deux lés comportant chacun un panneau photovoltaïque. Chaque panneau est formé de 3 modules de 8 unités en longueur. Les 3 modules sont connectés entre eux en série pour atteindre une tension de fonctionnement de 45 V et une tension de circuit ouvert de 57 V. Les panneaux sont connectés entre eux en parallèle. La puissance crête de chacun des panneaux est de 44,8 W_c. Le store composé de 2 lés a une capacité de production de 99,6 W_c.

Onduleur

Trouver un onduleur pour un store ayant ces capacités est aujourd'hui assez difficile. Au moment où ce prototype a été réalisé, les constructeurs d'onduleur proposaient des modèles adaptés aux petites installations. En effet, d'après le rapport du syndicat des énergies renouvelables SOLER «Etude du parc solaire photovoltaïque au 31 Décembre 2009» [73], bien que 91 % des installations en France aient une capacité inférieure ou égale à 3 KW, seulement 295 installations sont inférieures à 1 KWc. Ceci explique pourquoi certains modèles d'onduleurs ne sont plus fabriqués aujourd'hui. Flexcell avait utilisé un modèle nommé Soladin 120 de marque Mastervolt qui n'est plus commercialisé aujourd'hui.

De plus, la plupart des modèles a des fourchettes de tension dont la tension minimum est supérieure à 100 V. Mastervolt propose des produits de puissance minimum nominale de 1200 W et une fourchette de tension d'entrée de 100 à 320 V.

La société DMI propose cependant des onduleurs dont la puissance nominale est moins importante (de 150 à 1300 W selon le modèle) ainsi qu'une fourchette de tension dont la tension d'entrée est inférieure à 100 V.

Il apparaît donc de manière évidente que le modèle de store ainsi conçu a une trop faible capacité de production énergétique pour répondre aux contraintes. Il faudrait donc avoir une taille minimum pour satisfaire les tendances du marché.

Connectique

La connectique a été réalisée de la même manière que pour le store camping-car. C'est-à-dire qu'une languette a été positionnée par confection sur la barre de charge. Un boîtier dont la forme épouse celle de la barre de charge protège la connexion réalisée ainsi que la diode. Une diode série est mise sur chacun des panneaux afin d'éviter les déséquilibres parallèles du système. Une fois la connexion série des panneaux réalisés, il faut ajouter une diode parallèle « by-pass ».

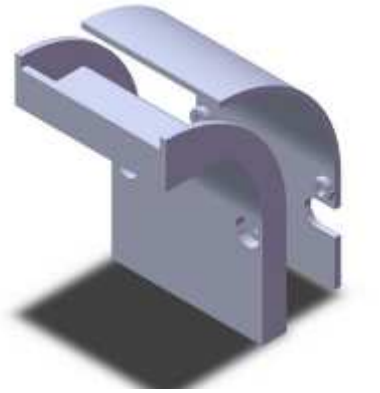


Figure 75 : *Vue éclatée du boîtier de connexion*



Figure 76 : *Boîtier de connexion contenant une diode, la soudure des électrodes planes du panneau photovoltaïque aux câbles*

Comportement mécanique du store

La tension du store est de 330 N. Pour une telle avancée, le point le plus bas du store est 2 cm en dessous de la droite passant par les points de suspension de la toile de store.

Le deuxième essai a consisté à réaliser un store de grande taille. L'armature choisie pour cet essai est une armature de marque Harol et de modèle LX 530. La place disponible dans le coffre nous a permis de dimensionner la toile de la manière suivante :

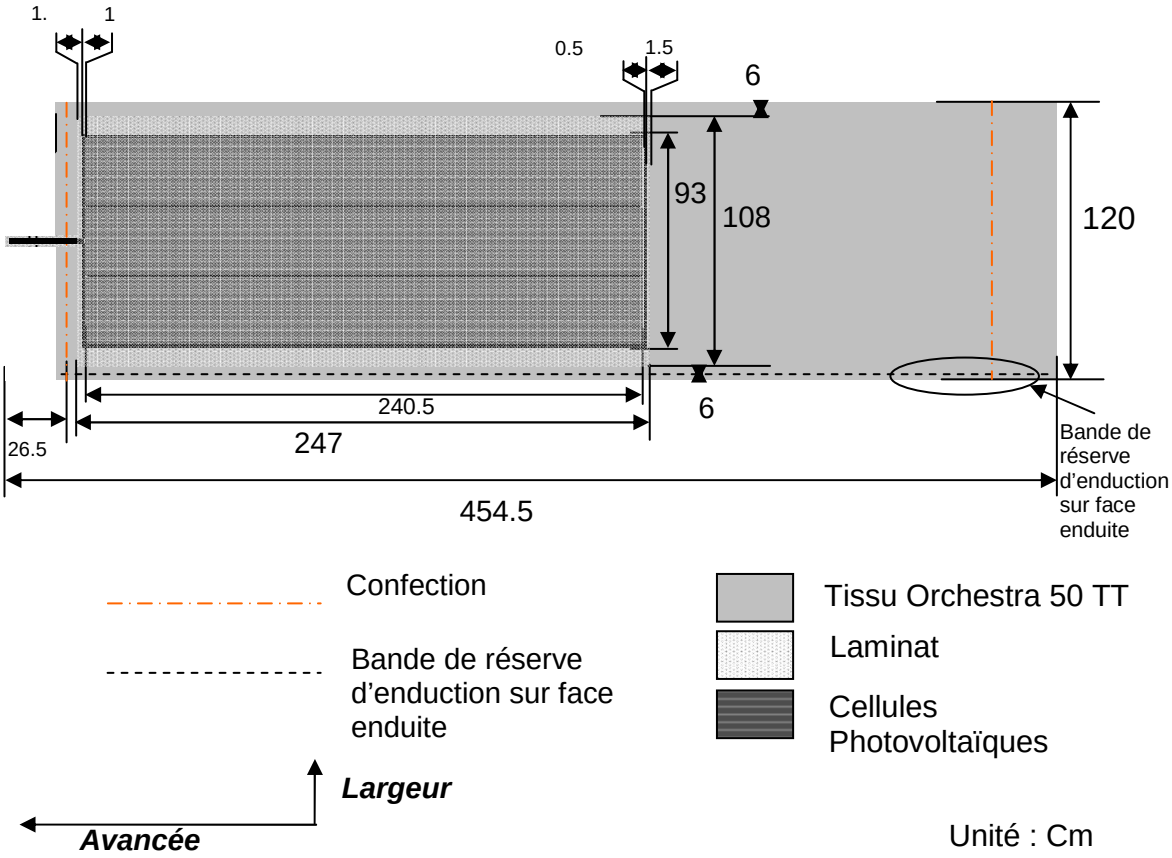


Figure 77 : *Disposition du panneau photovoltaïque sur un lé de store résidentiel*

De telles épaisseurs nous auraient permis de rentrer théoriquement 6 m de toile laminée. Afin de tester et de réaliser étape par étape, nous avions choisi de réaliser une toile de taille inférieure comportant 247 cm de long pour une longueur totale de 454 cm. Pour des raisons inhérentes à des problèmes de lamination, cette toile a été réalisée mais n'a pas pu être montée. La toile a été déformée lors de la lamination et n'est plus rectangulaire. Ce problème est décrit dans le chapitre suivant.

De plus, aucune diode de protection sur les panneaux photovoltaïques unitaires n'avait été prévue.

La toile réalisée comporte 5 lés. La tension nominale de chaque panneau sur un lé est de 45 V. Il est impossible de réaliser une connexion série parallèle avec un nombre impair de panneau. Il faut donc que les panneaux soient tous connectés en parallèle ou en série. Si chaque panneau avait été connecté à son voisin en série, nous aurions atteint une tension maximale de 285 V.

Cette tension est acceptable pour un onduleur de type SMA 1200. Chaque panneau a une puissance nominale de 85,5 $W_{c.}$ La totalité de l'installation aurait donc une puissance de 427 W ce qui paraît faible pour un tel onduleur dont la puissance maximale d'entrée est de 1320 W [74].

Une simulation a été réalisée grâce à un logiciel « SMA » nommé Sunny Design.
On s'aperçoit ainsi que pour 225 V et une puissance de 427 W_c, le rendement n'est pas optimisé. Le système risque donc de ne pas être adapté.

Remarques : SMA propose de nombreux modèles d'onduleur, c'est la raison pour laquelle dans cette étude, ce fabricant est pris comme référence. De plus, la plupart des onduleurs dans le marché actuel a des puissances nominales minimums comprises entre 1000 et 1500 W. Enfin, le modèle choisi (SMA SB 1100) peut très bien ne plus être commercialisé s'il n'est plus dans les exigences du marché.



Figure 78 : *Simulation du store résidentiel de 5 lés avec un onduleur SMA Sunny Boy SB 1200*

Une autre simulation a été réalisée avec un simulateur fournit par le fabricant d'onduleurs Mastervolt. L'onduleur choisi pour cette application est un Soladin 600.
Les caractéristiques techniques d'entrée sont les suivantes :

- Puissance nominale : 550W DC
- Puissance maximum : 600W DC
- PV power range 160 - 700 W_p
- Gamme de tension nominale d'entrée : 40-125V DC
- Tension maximum : 155V DC
- Courant : 8A DC
- Nombre de chaînes d'entrée : 1

[75]

Toutefois, les panneaux photovoltaïques doivent être connectés entre eux en parallèle. Là encore, le système n'est pas adapté à l'onduleur. De plus, cet onduleur

ne possède pas de fonction de découplage au réseau selon la norme DIN VDE 0126. Ceci signifie qu'il faut ajouter la protection de découplage lors de l'achat de l'onduleur.

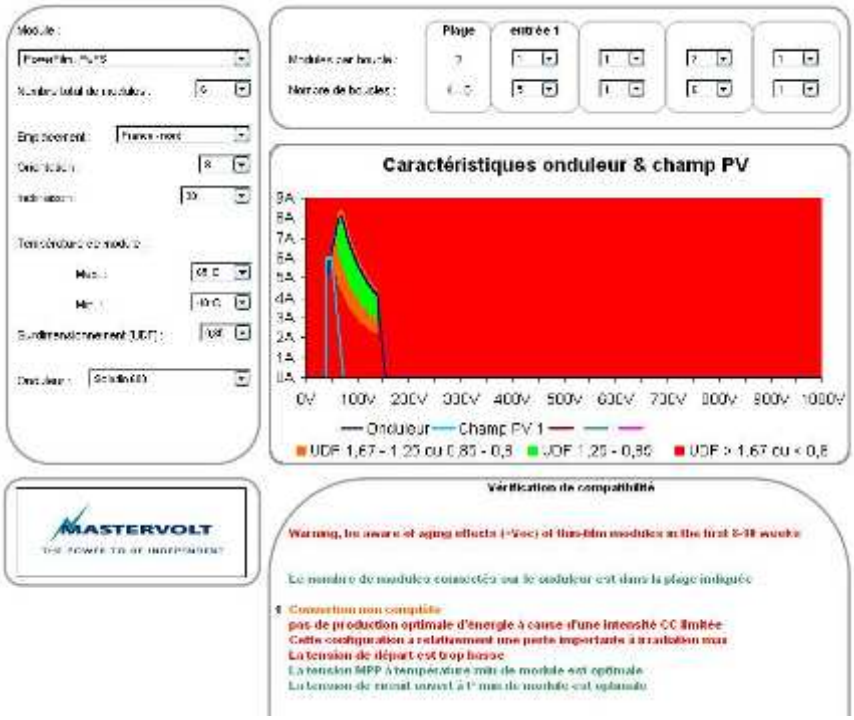


Figure 79 : *Simulation du store résidentiel de 5 lés avec un onduleur Mastervolt Soladin 600*

III.1.D. Analyse et perspectives

Il est possible d'optimiser le rendement de l'installation en augmentant la surface de cellules photovoltaïques.

En effet, si le tube d'enroulement et les bras du store peuvent supporter le poids d'une telle toile, il doit être possible d'augmenter la surface de manière à atteindre 1000 $W_{c,}$ c'est-à-dire au moins doubler la taille de la cellule.

Toutefois, il est impossible aujourd'hui de réaliser une telle toile avec des cellules photovoltaïques de marques PowerFilm Solar®. Les cellules n'étant pas certifiées selon les normes IEC 61646 [26] et 61730 [27], il est impossible de connecter au réseau et revendre l'électricité produite.

Pour cette raison, il est préférable d'utiliser des cellules de marque Flexcell qui ont déjà été certifiées. En effet, une extension de certification peut être accordée par le fournisseur de cellules Flexcell. La largeur de leur cellule étant plus grande, il sera plus facile d'atteindre des surfaces désirées pour obtenir la valeur de puissance crête de 1 $kW_{c.}$

Suite à nos observations précédentes, il est préférable d'établir des modèles de stores avec un nombre de lés prédéfini et dont la puissance est supérieure à 1 kW_c.
Une solution alternative consiste à utiliser des modèles de petites tailles groupés pour des résidences par exemple. Ceci nécessite tout de même des études personnalisées à chaque application (orientation, inclinaison, onduleur à utiliser…).

Enfin, certains établissements comme les hôtels ont des stores de très grandes dimensions (10 m de large). Ces stores ont plus de 2 bras, ils sont un support idéal pour l'application de stores photovoltaïques.

III.1.D.a Stores standards de petites dimensions

Comme démontré précédemment, utiliser des stores photovoltaïques de petites dimensions permet d'équiper des bureaux, des résidences ou des immeubles. Les stores ainsi conçus doivent ne comporter que 2 lés afin de pouvoir être connectés en série ou en parallèle ou encore une association en série parallèle. Un store de 2 lés paraît être un bon compromis pour des fenêtres de taille moyenne.
Chaque application doit faire l'objet d'une étude précise afin de déterminer les meilleurs composants de l'installation. Pour optimiser au mieux l'installation, il faut utiliser des stores de même taille pour l'ensemble. Le dimensionnement des appareils va dépendre du nombre de stores et de la taille des fenêtres. Il est possible de faire des groupes de stores et de relier chacun des groupes à un onduleur. Une autre solution consiste à regrouper l'ensemble des stores à un onduleur dit central.

III.1.D.b Stores standards résidentiels de grandes dimensions

Il est préférable pour éviter toute complication d'avoir un store dont le nombre de lés est standard.

$$l = \frac{P_{Totale}}{n \times P_c \times 2 \times L}$$

Avec
l : longueur du panneau photovoltaïque
L : largeur du panneau photovoltaïque
n : nombre de panneaux photovoltaïques
P_c : puissance crête
P_{Totale} : puissance totale du store photovoltaïque

Ainsi, pour un store de 1 kW_c composé de 5 panneaux photovoltaïques, de marque Flexcell dont la largeur est de 48,6 cm et de rendement de 5%, l'avancée du store est d'au moins 4,27 m. L'épaisseur de la cellule Flexcell® étant supérieure à 1,5 mm avec le tissu, cela ne nous permet pas de rentrer la totalité de la toile dans les coffres de store. Il faut donc réduire l'épaisseur de la cellule et/ou augmenter le nombre de lés du store (6 lés).

III.1.E. Perspective de disposition des cellules sur la toile

Il est préférable au vu des tensions à atteindre que les panneaux photovoltaïques unitaires soient branchés en série. De plus, pour éviter les effets d'ombrages et dégrader l'un ou l'autre panneau, il est préférable de réaliser la connexion avec 3 électrodes, ceci afin de shunter le panneau ombragé grâce à une diode « by-pass ».

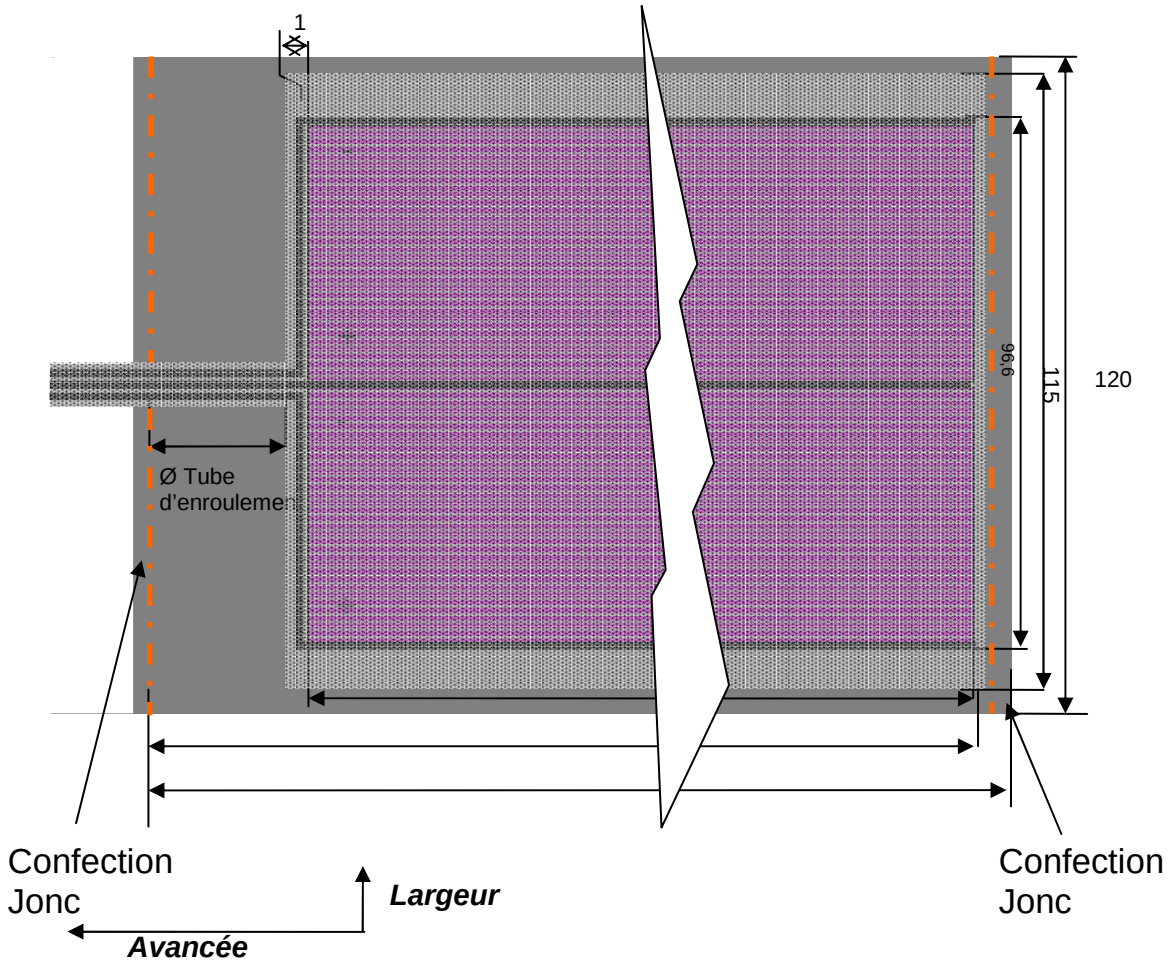


Figure 80 : *Disposition panneaux photovoltaïques unitaires connectés en série sur lé central pour un store dont la connectique est dans le tube d'enroulement*

III.1.E.a Connectique

Il est possible de réaliser la connectique directement dans le tube d'enroulement pour éviter les efforts de traction sur les câbles. De plus, cela permet de ne pas utiliser les rainures dans les bras pour passer les câbles électriques. Une pièce a été réalisée pour effectuer la transmission de l'énergie électrique produite par la toile de store à un élément de bâti. Les électrodes sont directement ramenées au niveau du tube d'enroulement. Le tour mort étant fixe, les soudures sur les électrodes ne sont pas soumises à des efforts importants. Le tube d'enroulement doit être usiné afin de laisser passer un boîtier de connexion. Les câbles pourraient donc être passés dans le tube d'enroulement au bout duquel une pièce de transmission équipée de plots en cuivre transmet l'énergie électrique.

La pièce de transmission est directement accrochée à l'extrémité du moteur tubulaire. Elle est composée de 2 parties :

- partie fixe comportant des pistes circulaires dont le centre est l'axe de rotation du tube d'enroulement
- partie mobile composée de plots en contact avec les parties circulaires et maintenue contre ces pistes avec un ressort.



Figure 81 : *Moteur tubulaire solidaire du système de connectique intégré (noté collecteur)*

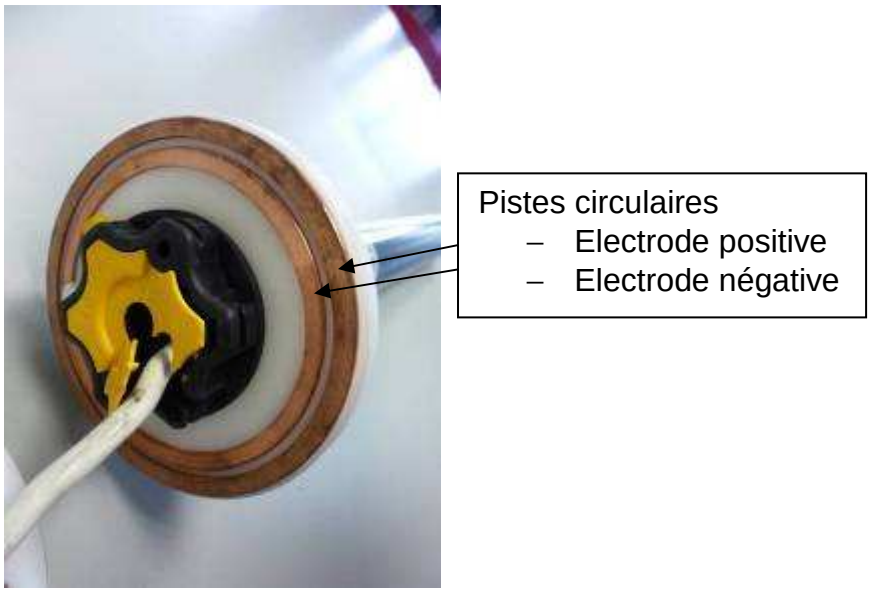


Figure 82 : *Partie fixe du collecteur comportant les pistes*

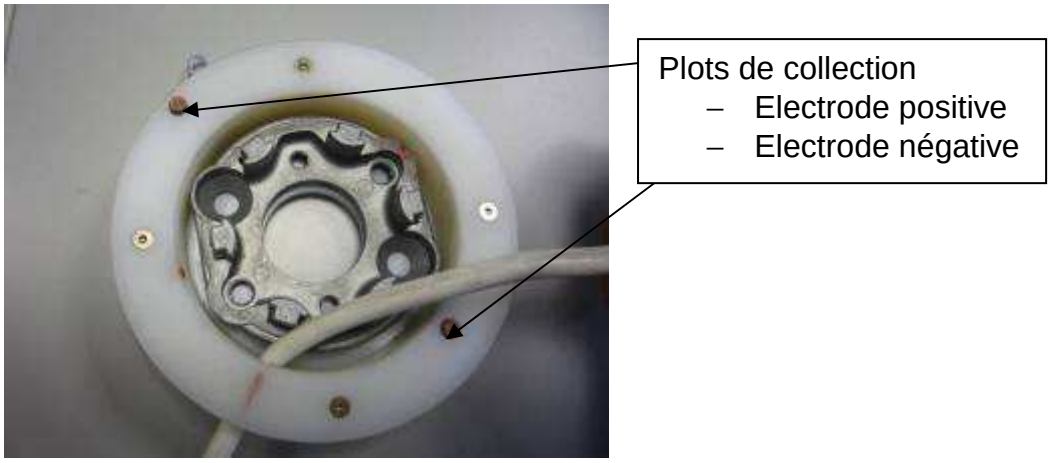


Figure 83 : *Partie mobile (mouvement de rotation) du collecteur comportant les plots*

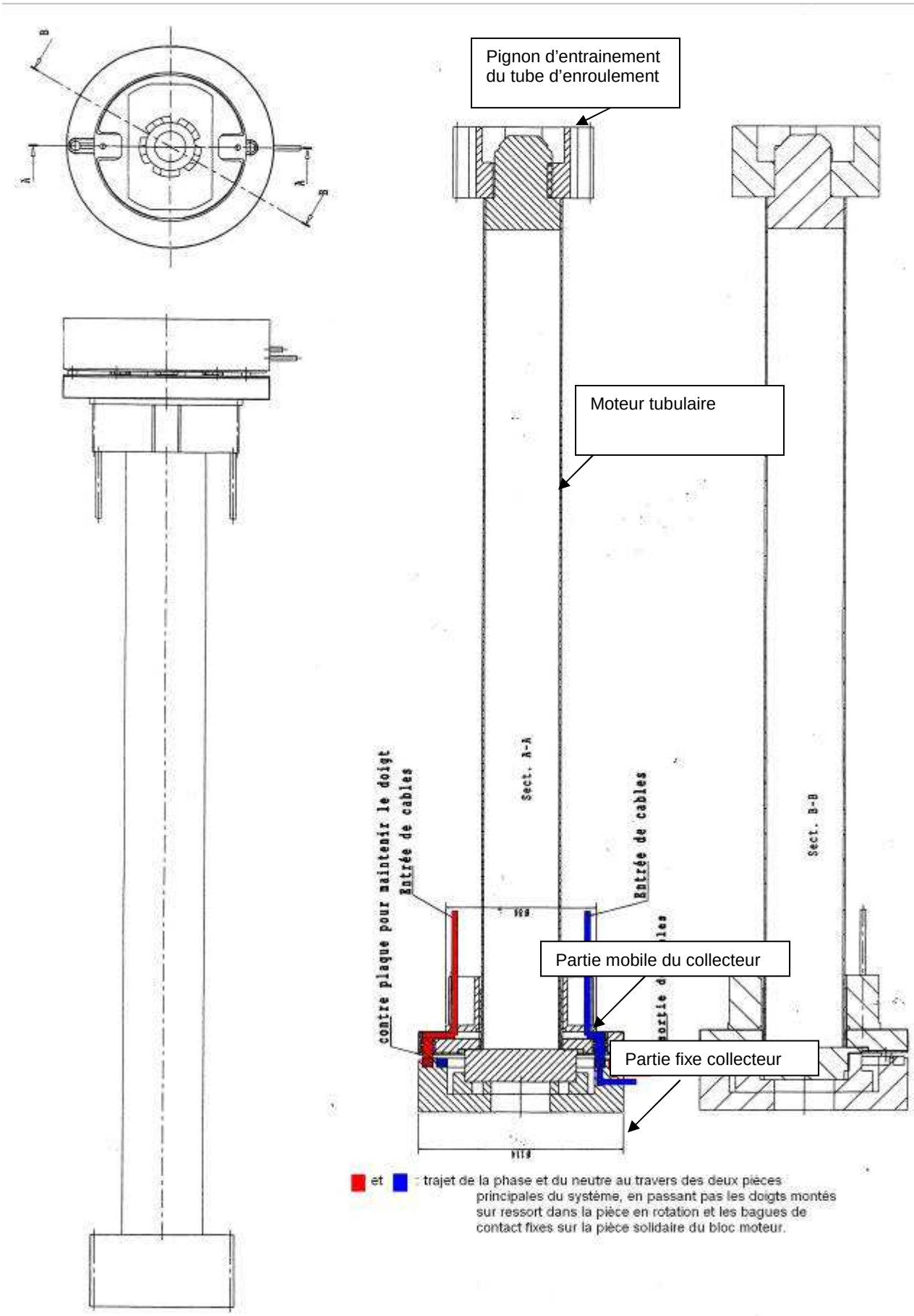


Figure 84: *Vue en coupe des différentes pièces solidaires du moteur*

Le dimensionnement des plots et des pistes dépend de la matière, du volume des éléments conducteurs et de la quantité d'énergie électrique à transporter.

La matière choisie pour réaliser les pistes est du cuivre. Cependant, l'oxydation du cuivre peut baisser la conductivité du collecteur. Les pistes et les plots ont été dimensionnés avec la même formule que celle utilisée pour déterminer la section minimale des câbles :

$$S = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l \cdot I}{\varepsilon \cdot V_{CO}}$$

Avec :

ΔU : différence de tension (V) ($\Delta U = V_{MPP} - V$)
ε : pourcentage de perte de tension (%)
V_{CO} : tension de circuit ouvert (V)
V_2 : tension aux bornes du régulateur de charge (V)
I : intensité (A) ($I = 1{,}25 \times I_{cc}$)
I_{CC} : intensité de court circuit (A)
R : résistance du conducteur (Ω)
ρ : résistivité du matériau ($\Omega \cdot m$)
l : longueur du conducteur (m)
S : section du conducteur (m²)

IV. Lamination

Les chapitres précédents ont mis en évidence l'importance de la maîtrise du procédé de lamination pour réaliser le projet d'intégration de cellules photovoltaïques dans des structures textiles. Au cours de l'étude, plusieurs méthodes de lamination ont été étudiées. Pour comprendre et appréhender ce procédé, il est impératif de le connaître tel qu'il est réalisé de façon traditionnelle (cf. Annexes). Dans ce chapitre nous présentons dans un premier temps les essais de lamination des cellules photovoltaïques avec différents supports textiles en utilisant des procédés existants. Ceci nous a permis d'identifier les problèmes qui apparaissent lors de la création du composite textile – cellules photovoltaïques. Ainsi, une nouvelle méthode de lamination en continu (roll to roll) en condition atmosphérique a été développée, dans le cadre de cette thèse de doctorat, permettant un contact plan sur une grande surface entre le textile et la cellule. L'avantage de notre procédé est que la production en grande série devient possible et que la qualité du composite correspond aux attentes des utilisateurs (sans plis, durabilité, fiabilité, prix…).

IV.1.A. Les essais réalisés

Le but de ces essais est de déterminer un procédé permettant d'industrialiser la fabrication des toiles photovoltaïques. Cependant, certains équipements ou procédés appartenant à nos fournisseurs ou encore pour des raisons économiques, il n'a pas toujours été possible de réaliser tous les tests imaginés.

IV.1.A.a Machine de lamination sous vide

La lamination réalisée en statique est le procédé le plus couramment utilisé dans l'industrie photovoltaïque. C'est pour cette raison que nous avions commencé par ce type de lamination. C'est avec une machine appartenant à Flexcell que les premières toiles photovoltaïques destinées à équiper un store ont été laminées.

Le procédé mis en place par Flexcell est statique (cf. Machine de marque 3S [77]. Ce procédé classique est utilisé pour faire des vitres feuilletées ou encore des encapsulations de cellules silicium (poly ou mono cristallin) entre deux plaques de verre.

IV.1.A.a.i La machine de lamination

La machine comprend une table de charge, une cellule de lamination et une table de refroidissement :

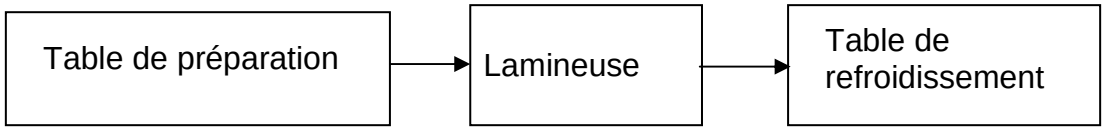


Figure 85 : *Schéma du process de lamination*

Le cycle de lamination se déroule de la manière suivante :

- Attente de montée en Température (entre 148-152℃) ;

- Chargement : levé plateau et avancée table ;
- Attente pendant laquellle les pics sont levés, le plateau n'est pas en contact avec la source de chaleur ;
- Baisse pics et membrane ;
- Attente : 400 s ;
- Sortie.

Remarque : *le tissu reste en contact avec la source de chaleur à 150℃ pendant 490 secondes, soit 8 minutes et 10 secondes.*

- **Table de préparation ou chargement**

Cette table permet d'étaler le tissu et déposer les différentes couches avant lamination.
Elle est équipée d'un tapis roulant permettant de faire avancer le textile dans la lamineuse.

- **Lamineuse**

La table est équipée d'un système d'aspiration pour faire le vide sous la membrane de lamination. Ceci permet d'éviter des bulles d'air entre le tissu et le laminat.

Tableau 1 : *Réglages machine lamination*

Paramètres	Valeurs
Température (℃)	150
Pression (mBar)	0,95
Vitesse (m/s)	0
Temps (min)	8,16
Dimensions (m)	3,5×2,1
Surface (m²)	7,35

- **Table de refroidissement**

Cette table a été installée au début de l'année 2008 par Flexcell. Elle n'a donc pas pu servir lors des premiers essais qui se sont déroulés au cours de l'année 2007. La table est équipée d'un système d'aspiration.
Une membrane posée sur le tissu assure le vide entre la table et le tissu. Un liquide de refroidissement circule sous la table en aluminium pour permettre au tissu de revenir à température ambiante le plus rapidement possible.

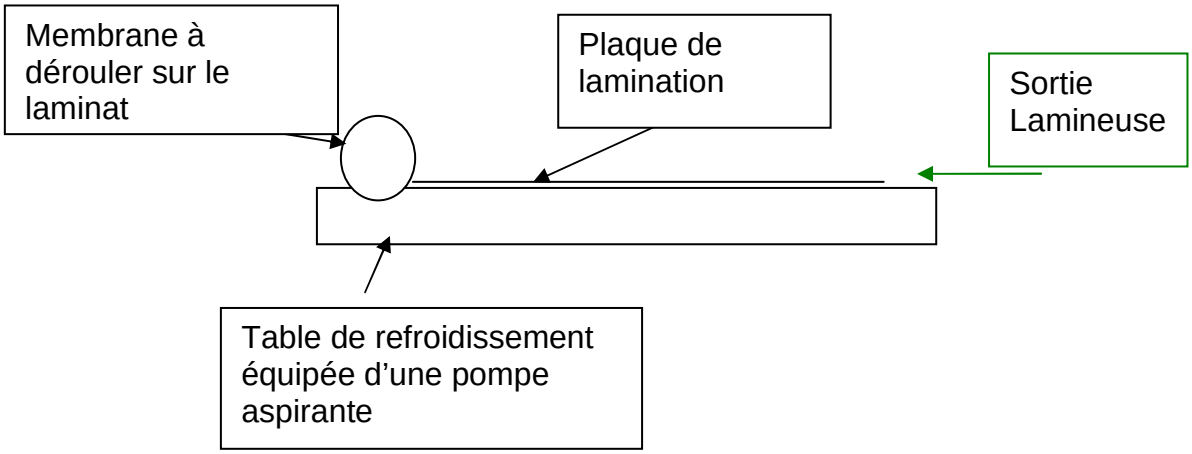


Figure 86 : *Schéma du process de lamination*

IV.1.A.a.ii Les différents essais

Les paramètres précédemment énoncés ne peuvent pas être modifiés. Bien que la température de fusion de l'EVA ait été mesurée à 128℃ lors de nos tests DSC, les tests effectués par Flexcell révèlent la nécessité de laminer l'EVA à 150℃ pendant au moins 8 minutes.

Dans un premier temps, il a été préférable de voir si les paramètres de lamination sous vide dégradent la toile. Puis, après avoir qualifié la toile acrylique, nous avons réalisé des laminations comportant les cellules pour les différentes applications décrites au chapitre précèdent.

Pour des raisons de confidentialité, il a fallu limiter le nombre de tests. La concurrence avec Flexcell et le coût élevé de chacun des différents tests ne nous ont pas permis de réaliser la totalité des essais imaginés.

- **Composition du laminat**

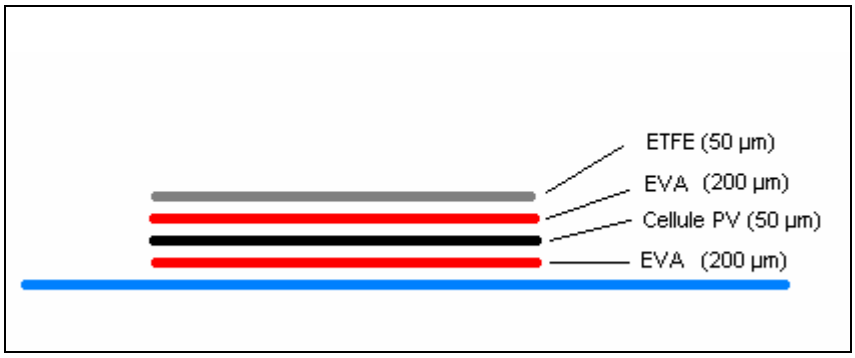


Figure 87 : *Schéma en coupe, composition de la préforme laminée*

- **Décomposition du complexe laminé**

Le superstrat : Tissu

Le tissu utilisé est un Orchestra 50 TT. Il est composé de fils acrylique teint masse. L'armure est une toile dont le nombre de fils chaine est supérieur à celui du nombre de fils de trame. Ceci permet une meilleure résistance dans le sens de l'avancée lorsque le tissu est monté dans l'armature du store. On dénombre 30 fils par centimètre en chaîne pour 15 fils par centimètre en trame. Ce tissu est enduit sur l'une des deux faces avec une enduction acrylique et fluoré-carbone. Le tissu est traité par foulardage dans un bain fluoré pour qu'il puisse être déperlant même sur la face enduite.

La cellule photovoltaïque est laminée sur la face non-enduite.

Le tissu acrylique est déformé lorsqu'il est soumis à une température ambiante de 180℃.

Le superstrat : ETFE

Le polymère utilisé pour la face supérieure de la cellule est de l'ETFE de marque Saint-Gobain, et de modèle Norton. Il est traité avec un traitement plasma corona sur l'une des deux faces pour améliorer l'adhérence de la face en contact avec l'encapsulant qui permettra l'assemblage du complexe.

Les caractéristiques de l'ETFE utilisées sont regroupées dans le Tableau B (Annexes).

L'encapsulant

L'encapsulant utilisé est l'éthylène vinyle acétate de la marque Etimex. Afin de déterminer ses caractéristiques physiques, une analyse DSC a été réalisée (Figure 88)

Ainsi, les principales caractéristiques de l'EVA utilisé sont :

- température de transition vitreuse : 46,87 ℃,[2]
- température de fusion : 128, 19 ℃,
- température de cristallisation : 32,49℃.

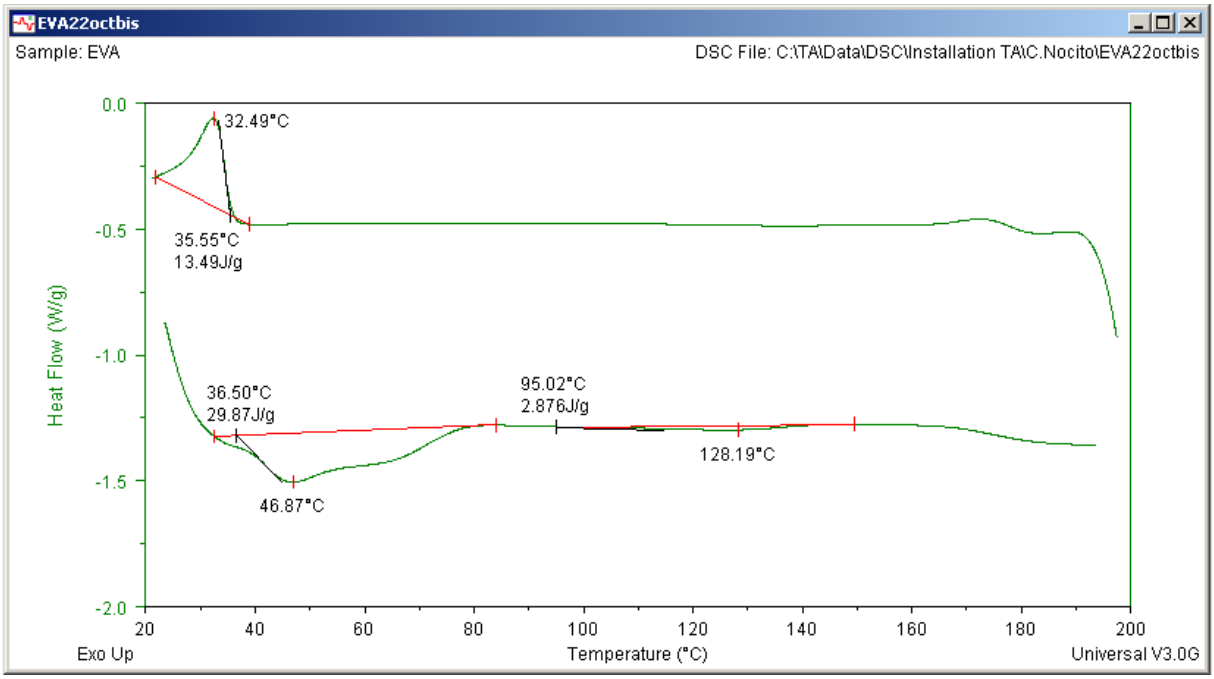


Figure 88 : *Analyse DSC de l'EVA Etimex*

La fiche technique de l'EVA utilisé pour réaliser les préformes laminées est donnée en Annexes Tableau C.

IV.1.B. Qualification de la toile

La première étape sert à s'assurer que la toile ne perd pas ses caractéristiques techniques et n'est pas dégradée après le passage sur la table de lamination.
Cette étape a été faite dans le but de fabriquer les premiers prototypes de stores camping-car (version 0 et leurs essais correspondants).

Deux éprouvettes de tissu ont été laminées pour connaître l'influence des paramètres de lamination. La première a été refroidie sous pression en sortie de table de lamination tandis que la seconde n'a pas subi ce traitement.

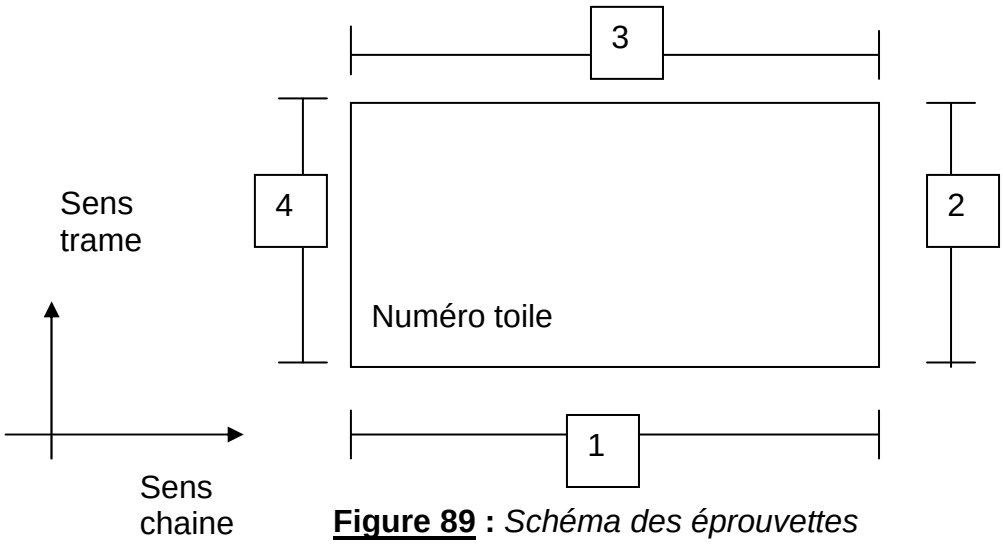


Figure 89 : *Schéma des éprouvettes*

Tableau 2 : *Description des éprouvettes*

N°toile	attribution
1	cycle 150 C°, sans pressage
2	cycle 150 C°, avec pressage

IV.1.B.a Aspect visuel

Une fois laminées, les toiles sont très plissées. Les plis sont orientés dans le sens de la trame. On s'aperçoit que la méthode de refroidissement n'a pas amélioré l'aspect visuel de la toile laminée.



Figure 90 : *Echantillon 1*



Figure 91 : *Echantillon 2*

Déformations dimensionnelles

Les toiles ont été mesurées avant et après avoir été laminées.

Tableau 3 : *Mesure des échantillons avant lamination sur toile nue*

N°toile	Cote 1 (mm)	Cote 2 (mm)	Cote 3 (mm)	Cote 4 (mm)
1	1418	753	1420	753
2	1416	753	1419	751

Tableau 4 : *Comparatif des méthodes, mesure des échantillons après lamination sur toiles laminées*

N°toile	Cote 1 (mm)	Cote 2 (mm)	Cote 3 (mm)	Cote 4 (mm)
1	1405	753	1410	753
2	1400	753	1405	753

On définit l'allongement en chaîne et en trame avec la formule suivante :

$$Allongement\,(\%) = \frac{L_{finale} - L_{Initiale}}{L_{initiale}} \times 100$$

Les valeurs négatives sont analysées comme des retraits.

Tableau 5 : *Calculs des retraits sur les différents côtés de l'éprouvette*

N°toile	Cote 1 (%)	Cote 2 (%)	Cote 3 (%)	Cote 4 (%)	Moyenne cotes 1-3 (%)	Moyenne cotes 2-4 (%)
1	-0,92	0	-0,7	0	-0,81	0
2	-1,13	0	-0,99	0,27	-1,06	0,13

D'après le Tableau 5 récapitulant la variation dimensionnelle en chaîne et en trame de chacun des échantillons, on s'aperçoit qu'en trame (cotes 2 et 4) on observe un allongement, tandis qu'en chaîne (cotes 1 et 3), on observe un retrait.
Les plis étant dans le sens de la trame, il est logique que la variation dimensionnelle en chaîne soit un retrait.
Caractéristiques techniques

Les méthodes de mesure utilisées pour caractériser le composite sont données en Annexes.

IV.1.B.b Mesures réalisées

Chacune des caractéristiques a été mesurée sur 3 échantillons, même si la norme stipule l'utilisation d'un nombre supérieur d'échantillons. Ceci s'explique par un coût élevé de la production d'échantillons et par le fait que ces essais sont réalisés dans un contexte industriel.

Tableau 6 : *Résultats des tests de caractérisation des tissus laminés*

	Résistance		Déchirure amorcée		Rigidité				
N°toile	Traction Chaine (daN)	Traction trame (daN)	Déchirure Chaine (daN)	Déchirure trame (daN)	Rigidité Chaine (cN)	Rigidité trame (cN)	Schermerber (mm)	Traction Chaine (daN)	Traction trame (daN)
Test	NF EN ISO 13934-1		NF EN ISO 13937-1		ISO 2493		ISO 811	NF EN ISO 5084	NF G 07 150
Neutre	160,25	107,7	2,7	2,02	910	660	870	0,73	333
1	155,33	101,23	2,49	1,91	1543,00	840,00	995,00	0,64	322,00
2	137,93	91,93	2,52	1,90	1379,00	821,00	1110,00	0,64	322,00

Tableau 7 : *Pourcentages de variations des tests de caractérisation des tissus laminés (éprouvettes 1 et 2) par rapport aux échantillons neutres*

	Résistance		Déchirure amorcée		Rigidité				
N°toile	Traction Chaine (%)	Traction trame (%)	Déchirure Chaine (%)	Déchirure trame (%)	Rigidité Chaine (%)	Rigidité trame (%)	Schermerber (mm)	Traction chaine (%)	Traction trame (%)
Test	NF EN ISO 13934-1		NF EN ISO 13937-1		ISO 2493		ISO 811	NF EN ISO 5084	NF G 07 150
1	-3,07	-6,00	-7,78	-5,45	69,56	27,27	14,37	-12,39	-3,30
2	-13,93	-14,64	-6,54	-5,78	51,54	24,39	27,59	-12,39	-3,30

La plupart des valeurs mesurées après lamination sont inférieures à celles mesurées sur le tissu neutre. Seules les valeurs mesurées pour le Schmerber (colonne d'eau) et la rigidité de la chaîne et de la trame sont augmentées.

La perte observée en résistance mécanique est certainement due à l'action de la température. Celle-ci a eu un effet inverse sur le comportement à la colonne d'eau du tissu.
Il peut être remarqué que les diminutions en résistance mécanique sont un peu plus importantes avec le pressage de la toile lors du refroidissement. Mais la valeur du Schmerber en est d'autant plus augmentée. On s'aperçoit tout de même que le poids de la toile reste inchangé quelle que soit la méthode de refroidissement.
Pour expliquer ces évolutions de caractéristiques, nous pouvons penser que suite à l'exposition à la température et à la pression, le tissu s'est écrasé mais aussi que le traitement d'imperméabilisation a pénétré dans le tissu en entraînant une meilleure valeur de colonne d'eau. La rigidité s'en trouve augmentée. Par ailleurs, la diminution de poids peut s'expliquer par la dégradation de la fibre et la perte d'une partie du traitement.

Caractéristiques dynamométriques après vieillissement

La résistance dynamométrique a été testée après vieillissement afin de connaître la résistance des toiles. Les toiles ont subi un vieillissement accéléré dans une machine Atlas.

Cinq cycles de vieillissement ont été faits sur la toile. Le Tableau 8 montre que les performances des toiles laminées ne sont pas trop diminuées en comparaison avec la toile neutre :

Tableau 8 : *Résistance dynamométriques des échantillons après 5 cycles de vieillissement*

	Résistance	
N°toile	Traction Chaine (daN)	Traction trame (daN)
Test	NF EN ISO 13934-1	
Neutre	129,5	62
1	147,3	81
2	154,6	83,88

La valeur mesurée en traction en chaîne est supérieure à sa valeur d'origine. Les écarts entre les valeurs mesurées sont très importants bien que les toiles aient subi le même cycle de vieillissement. La toile laminée ne vieillit pas comme la toile neutre.

Les tests ont été refaits sur d'autres toiles pour vérifier ces valeurs.

Toiles laminées (lamination avec la toile acrylique et cellules photovoltaïques non fonctionnelles)

Des préformes ont été ajoutés au tissu laminé pour voir leur influence.
Les mêmes gabarits d'éprouvettes que pour les tests précédents ont été laminés.

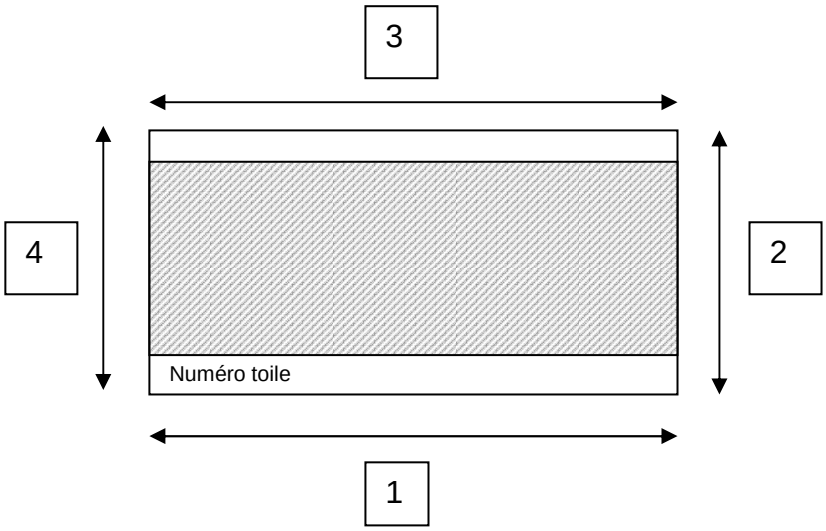


Figure 92 : *Schéma des éprouvettes*

Le laminat a une taille requise de 700×1420 mm. Pour travailler dans les conditions les plus proches de la réalité, une cellule photovoltaïque non-fonctionnelle a été ajoutée dans chacune des préformes. La cellule a une taille de 600 × 1200 mm.
Ces deux tests ont été faits indépendamment et ne peuvent pas être comparés entre eux car ils n'ont pas été réalisés avec le même lot de tissu. Ils permettent cependant de voir la variation de dimension par rapport à la toile avant que celle-ci soit laminée.

Tableau 9: *Description des éprouvettes*

N°toile	attribution
3	cycle 150 C°, sans pressage
4	cycle 150 C°, avec pressage

IV.1.B.c Aspect visuel

Les Figure 93 et Figure 94 montrent qu'une fois laminées, les toiles sont plissées. Les plis sont orientés dans le sens de la trame. Sur les échantillons laminés, ils ne sont localisés que sur un seul côté. Il y a beaucoup de plis sur l'envers du tissu à l'endroit du laminat. L'aspect visuel des toiles ne permet pas de conclure que ce type de lamination puisse être utilisé pour réaliser des toiles de store et ce, quelle que soit la méthode de refroidissement utilisée.



Figure 93 : *Echantillon 3*

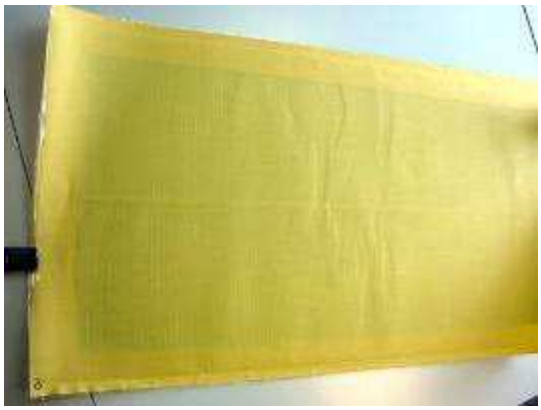


Figure 94 : *Echantillon 4*

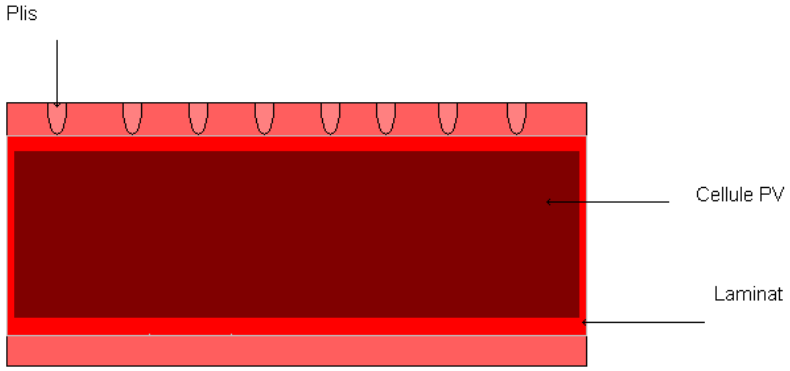


Figure 95 : *Les plis sur les toiles avec laminat*

IV.1.B.d Déformations dimensionnelles de la toile

Les toiles ont été mesurées de façon précise pour connaître leurs déformations. Les laminations ayant été réalisées de façon similaire, les laminats ayant tous la même largeur et longueur, nous nous sommes intéressés aux caractéristiques dimensionnelles de la toile.

Tableau 10 : *Mesure des échantillons avant lamination sur toile nue*

N°toile	Cote 1 (mm)	Cote 2 (mm)	Cote 3 (mm)	Cote 4 (mm)
3	1421	753	1421	752
4	1419	753	1418	752

Tableau 11 : *Mesure des échantillons avant lamination sur toile nue*

N°toile	Cote 1 (mm)	Cote 2 (mm)	Cote 3 (mm)	Cote 4 (mm)
3	1417	750	1419	751
4	1415	751	1414	750

Tableau 12 : *Calculs des retraits sur les différents côtés de l'éprouvette*

N°toile	Cote 1 (%)	Cote 2 (%)	Cote 3 (%)	Cote 4 (%)	Moyenne cotes 1-3 (%)	Moyenne cotes 2-4 (%)
3	-0,28	-0,40	-0,14	-0,13	-0,21	-0,27
4	-0,28	-0,27	-0,28	-0,27	-0,28	-0,27

On s'aperçoit sur les deux toiles qu'il n'y a eu que du retrait. Il est probable que les différences de retrait soient dues à la méthode de refroidissement des toiles laminées ou à la toile qui est différente pour chacune des éprouvettes.

On s'aperçoit cependant que le retrait est inférieur à 1% pour toutes les valeurs mesurées.

L'éprouvette 3 semble déformée, la variation des deux côtés dans le sens chaîne et dans le sens trame est différente (la valeur de la variation de la cote 1 est le double de celle de la cote 3 et celle de la variation de la cote 2 est environ 3 fois celle de la cote 4).

L'éprouvette 4 ne semble pas avoir été déformée puisque la variation sur chacun de ses côtés est identique.

IV.1.B.e Caractéristiques techniques

Le Tableau 13 montre les caractéristiques de la toile laminée. Les valeurs de résistance mécanique en traction qui sont fortement différentes avec ou sans cellules sont indiquées. Les autres mesures étant semblables, elles ont été intégrées dans la moyenne.

Les mesures ont été réalisées en plusieurs endroits sur les parties avec et sans cellules.

Tableau 13 : *Résultats des tests de caractérisation des tissus laminés*

	Résistance laminat + cellule		Résistance laminat		Déchirure amorcée				
N°toile	Traction Chaine (daN)	Traction trame (daN)	Traction Chaine (daN)	Traction trame (daN)	Déchirure Chaine (daN)	Déchirure trame (daN)	Schermerber (mm)	Epaisseur (mm)	Poids (g/m²)
Test	NF EN ISO 13934-1		NF EN ISO 13937-1		NF EN ISO 13937-1		ISO 811	NF EN ISO 5084	NF G 07 15 0
3	226,33	161,20	195,10	118,20	5,33	4,24	> 10000	1,38	1147
4	188,74	134,9	169,60	110,5	5,87	4,15	> 10000	1,45	1140

Les valeurs sont nettement supérieures à celles mesurées sur la toile. La valeur de résistance dynamométrique de la préforme contenant la cellule est supérieure à celle ne contenant pas la cellule.

Des valeurs de délamination selon la norme NF EN ISO-2411 relative à l'adhérence d'un revêtement ont été mesurées sur ces échantillons [76]. Pour chacun d'entre eux, la valeur avoisine 200 N sur les parties sans cellules correspondant aux bords de la préforme laminée. Cette valeur diminue très fortement à l'endroit où la cellule est laminée (3 à 4 N).

IV.1.B.f Caractéristiques dynamométriques après vieillissement

Tout comme les éprouvettes composées seulement de tissu, la résistance dynamométrique des éprouvettes 3 et 4 a été testée après vieillissement.
Cinq cycles de vieillissement accélérés ont été faits sur les toiles et leurs préformes laminées. Les résultats sont exposés dans le Tableau 14.

Tableau 14 : *Pourcentages de variations des tests de caractérisation des tissus laminés (éprouvettes 1 et 2) par rapport aux échantillons neutres*

	Résistance	
N°toile	Traction Chaine (daN)	Traction trame (daN)
Test	NF EN ISO 13934-1	
3	173,4	111,7
4	167,8	116,26

Une fois de plus, les résultats sont assez variables par rapport aux valeurs d'origine. Les valeurs sont cependant au dessus des valeurs requises pour l'application.

Les caractéristiques de la toile ne sont pas affectées. L'aspect visuel sur les endroits de toile ne comportant pas de laminat n'est pas acceptable. A cette époque, nous avons pensé que la méthode de lamination sous vide pouvait être améliorée afin d'éliminer les plis.

IV.1.C. Diminution des plis sur la toile

Pour diminuer les plis sur la toile et réaliser des préformes en grandes dimensions, destinées au store camping-car, des essais ont été réalisés.

Ne pouvant pas modifier le cycle de lamination, nous devions agir ou sur la toile elle-même ou sur le refroidissement en sortie de lamineuse.

Refroidissement
- Roulé à chaud autour d'un rouleau ;
- Refroidit à température ambiante sous une plaque métallique.

Modifications toile
- Toile dont le nombre de fils de chaîne est égal au nombre de fils de trame ;
- Toile assouplie avec traitement mécanique.

IV.1.C.a Refroidissement

Le seul paramètre changé lors du procédé de lamination est le refroidissement. Les essais ont été faits avec le même lot de toile et la même surface de préforme. La référence de toile utilisée pour ces essais est 0017 (Bleu).

Les toiles laminées sont réalisées selon le schéma Figure 96 et la préforme se décompose suivant la coupe visible en Figure 97. Lors de la lamination, une grille de protection est positionnée au dessus de la préforme. Celle-ci permet de maintenir les différentes couches et diminue le phénomène de rétractation des matériaux sous l'influence de la chaleur. Cette grille donne à la préforme laminée « un grain » améliorant ainsi son aspect visuel et son adhérence. Par ailleurs, l'ETFE ne doit pas être trop court pour éviter que l'EVA ne flue sur la grille et la détériore.

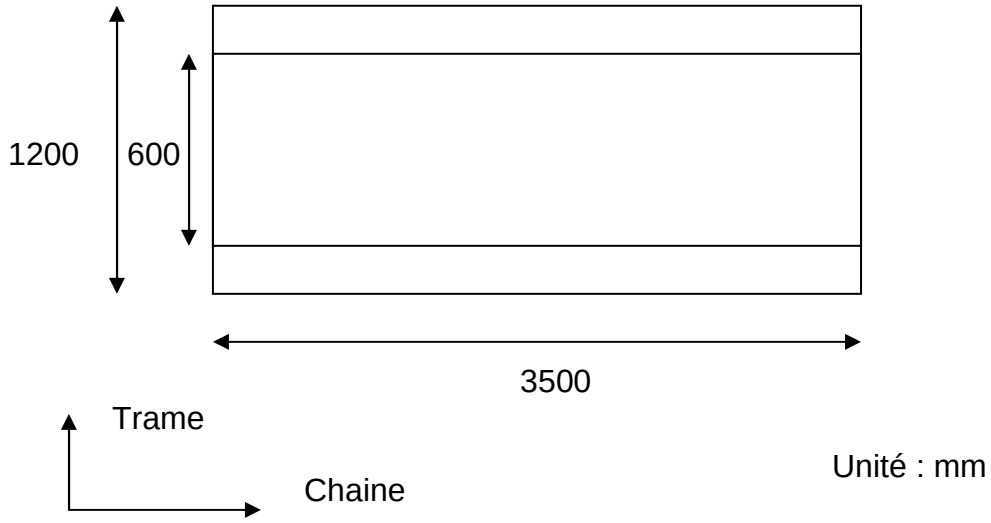


Figure 96 : *Schéma de la toile laminée*

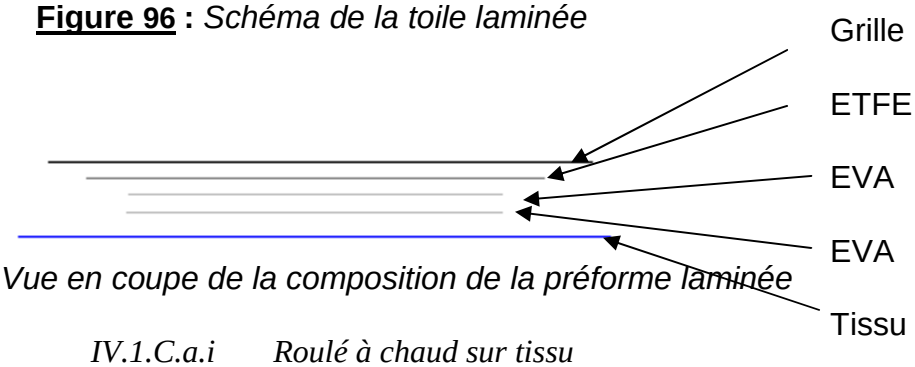


Figure 97 : *Vue en coupe de la composition de la préforme laminée*

IV.1.C.a.i Roulé à chaud sur tissu

Le principe est de rouler la toile après l'avoir laminée. La pression mise sur le tissu lors de l'enroulement permet d'éviter que le tissu se rétracte trop rapidement et soit plissé. Le tissu est resté enroulé 4 heures autour du cylindre.

- Observations en sortie de lamineuse

Peu de plis en sortie sur le textile.

- Résultat final

Les plis sont atténués par l'enroulement de la toile.

Avantage : diminue fortement les plis car maintien de la toile.

Inconvénients : mémoire de forme,
plis légers de roulage,
ne pas faire de froissure en roulant sinon irréversible.

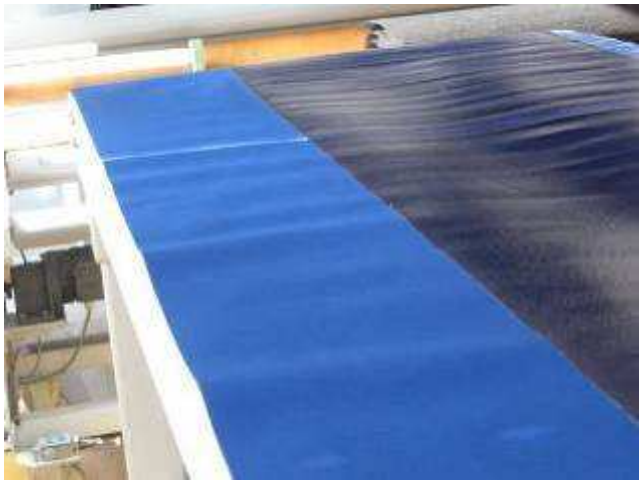


Figure 98 : *Plis « roulement » sur tissu après lamination*

IV.1.C.a.ii Refroidissement à température ambiante sous une plaque métallique

Le même essai de lamination a été réalisé sur la même toile mais refroidie sous une plaque métallique pendant 2 heures 30 avant d'être libérée pour laisser la place aux essais suivants.

- Observations en sortie de lamineuse

En sortie de lamineuse, le complexe était recouvert par la grille empêchant ainsi d'analyser le résultat. En effet, la plaque métallique a été posée rapidement sur le tissu afin de ne pas lui laisser le temps de se rétracter.

- Résultat final

Au final, les plis sur tissu n'avaient pas la même forme que ceux observés sur les toiles laminées précédentes. La partie de toile sans préforme est marquée par un pli léger en forme d'arc de cercle dont le bord du laminat parallèle à la laize en est la corde. Les plis aux abords des préformes laminés sont très légers et sont plutôt de forme elliptique.

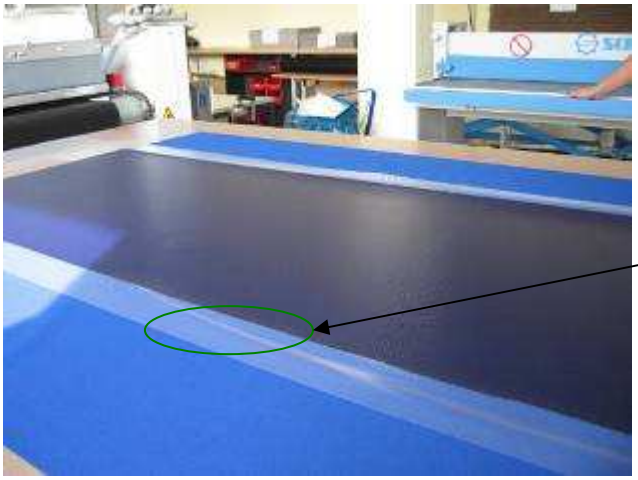


Figure 99 : *Essai après lamination*

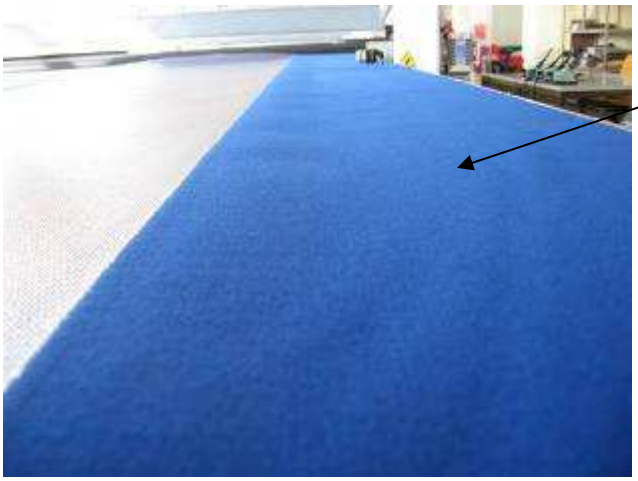


Figure 100 : *« plis » après lamination.*

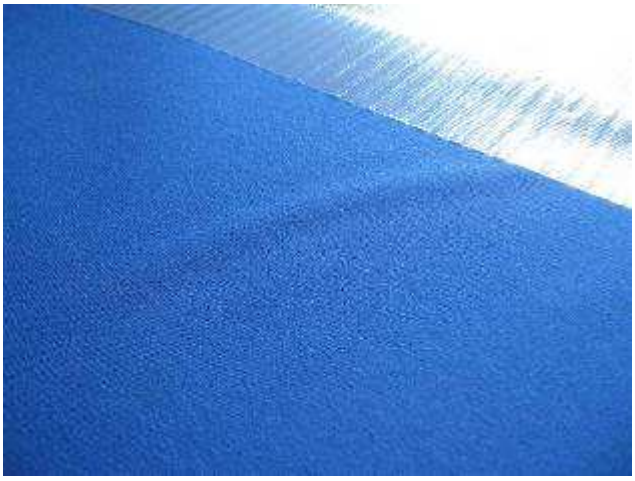


Figure 101 : *« plis » après lamination*



Figure 102 : *pli « banane » après lamination*

Avantage : le nombre de plis est diminué,

Inconvénient : plis existants dont la forme en arc de cercle ne peut pas être compensée par la tension après le montage sur le store.

Remarque : la grille de maintien marque la toile à cause de la pilosité de l'acrylique. Il est préférable que la grille occupe la totalité de la surface de la toile pour que la dégradation soit présente sur l'ensemble. Ceci atténue l'aspect visuel de la toile.

IV.1.C.b Modifications toile

Les plis observés en sortie de table étant toujours dans le sens trame et de forme elliptique lorsque celle-ci est composée d'une préforme laminée, nous avons pensé que cela pouvait être dû au déséquilibre entre le nombre différent de fils de chaîne et de trame par unité de longueur induisant ainsi une rigidité différente entre la chaîne et la trame. Ce déséquilibre peut être augmenté par le fait que le type de fibres composant le fil en chaîne et en trame puisse être différent selon les coloris utilisés.

Pour annuler ce phénomène, deux solutions ont été imaginées. La première consiste à égaler le nombre de fils en chaîne et le nombre de fils en trame que l'on nommera par la suite toile à structure carrée, la seconde à assouplir le tissu avec un traitement mécanique nommé Sanforisage pour égaler la rigidité en chaîne et en trame.

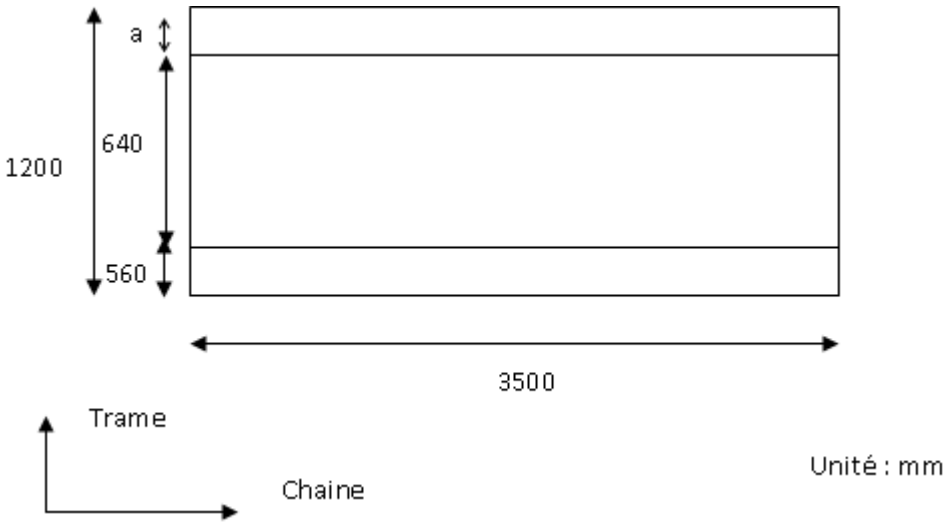


Figure 103 : *Schéma de la toile laminée*

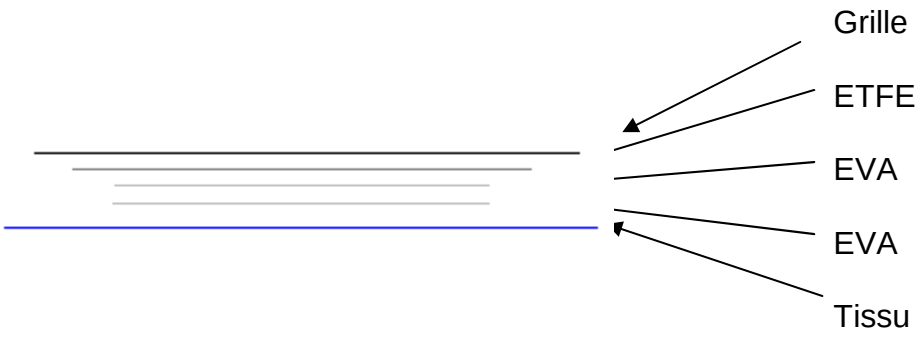


Figure 104 : *Vue en coupe de la composition de la préforme laminée*

IV.1.C.b.i Toile à structure carrée

Le but est d'égaler le nombre de fils en chaîne et en trame. La toile est composée de 19 fils en chaîne et 19 fils en trame. Le traitement chimique appliqué sur la toile est celui utilisé pour le 50TT. Après passage sur la rame de traitement, il a été remarqué que l'enduction avait traversée la toile. Ceci résulte du manque de fils en chaîne pour « fermer » le tissu. La valeur de Schmerber a été mesurée à 520 mm ce qui est fortement diminuée en comparaison d'un tissu Orchestra 50 TT dont la valeur avoisine 1000 mm.

La préforme a été positionnée sur la toile selon le schéma de la Figure 103 et composée comme sur la Figure 104. Le cycle de lamination effectué est le même que celui décrit pour les essais précédents. La toile a été refroidie en sortie de lamineuse par pression avec une plaque métallique.

- Observations en sortie de lamineuse

En sortie de lamineuse, le complexe était recouvert par la grille empêchant ainsi d'analyser le résultat. En effet, la plaque métallique a été posée rapidement sur le tissu afin de ne pas lui laisser le temps de se rétracter.

- Résultat final

La perméabilité du tissu aurait pu permettre à l'EVA de traverser la toile. Cela ne s'est pas produit. Cependant, des plis marqués ont été observés dans le sens trame sur la toile. Le nombre de plis est cependant inférieur à celui des essais précédents.



Figure 105 : *Toile à structure carrée en sortie de lamineuse. Opération de suppression, du surplus d'ETFE*



Figure 106 : *Résultat final*

IV.1.C.b.ii Toile assouplie par traitement mécanique

Certains traitements permettent de conférer de la souplesse à une toile sans la dégrader esthétiquement et diminuer de façon notable ses performances. Ces traitements peuvent être chimiques ou mécaniques. Dans le cadre de l'étude, il a été préférable d'effectuer un traitement mécanique nommé Sanfor. Ce type de traitement est surtout utilisé sur des tissus en coton. Destiné au linge de maison, équipements de protection individuels, il permet d'éviter le rétrécissement des étoffes textiles au cours de leur lavage. Le Tableau D récapitule les performances techniques de la toile ayant subie un traitement Sanfor et de la même toile neutre.

La préforme a été positionnée sur la toile selon le schéma de la Figure 103 et composée comme sur la Figure 104. Le cycle de lamination effectué est le même que celui décrit pour les essais précédents. La toile a été refroidie en sortie de lamineuse par pression avec une plaque métallique.

- Observations en sortie de lamineuse

En sortie de lamineuse, le complexe était recouvert par la grille empêchant ainsi d'analyser le résultat. En effet, la plaque métallique a été posée rapidement sur le tissu afin de ne pas lui laisser le temps de se rétracter.

- Résultat final

Aucun pli observé. Cette solution est la plus correcte en comparaison avec les précédentes en termes d'esthétisme de la toile.

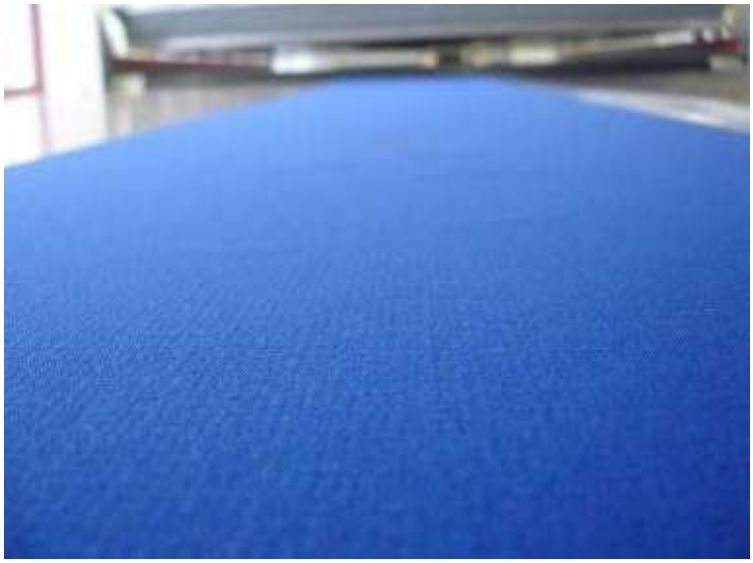


Figure 107 : *Observation de la toile « sanforisée » en sortie de lamineuse*



Figure 108 : *Résultat final après lamination sur toile « sanforisée »*

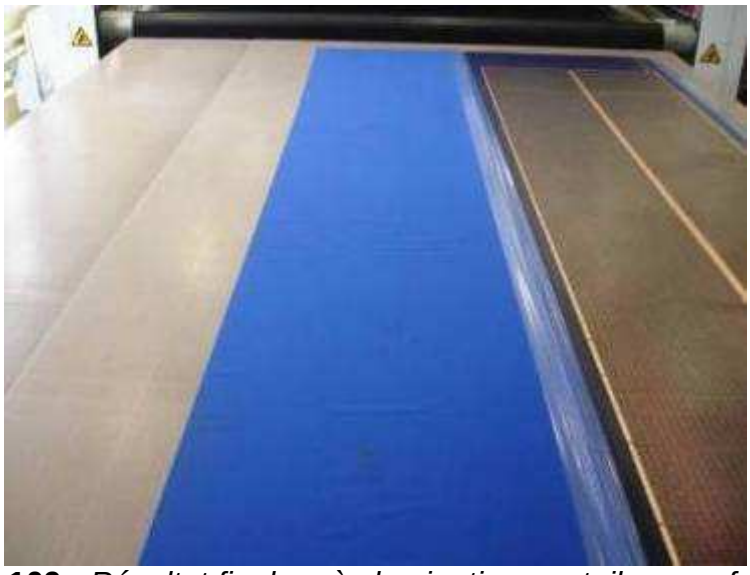


Figure 109 : *Résultat final après lamination sur toile « sanforisée »*

La contrainte principale fixée est relative à l'esthétisme de la toile. Les caractéristiques techniques n'étant pas diminuées de manière trop forte après lamination, cette méthode est la plus efficace.
On s'aperçoit grâce aux graphiques (Figure H, Figure H, Figure I, Figure J, Figure K, Figure L, Figure M, Annexes) illustrant les caractéristiques techniques de la toile que la principale perte se situe au niveau de la rigidité. Le Schmerber bien que diminué reste acceptable.

Les différents tests décrits ci-dessous nous ont permis de réaliser les essais présentés au cours du chapitre précédent.
Ceci dans le but de travailler le procédé de lamination sans négliger les autres aspects du projet.

Nous avons choisi lors des premiers essais de recouvrir la quasi-totalité des lés de toile de store avec du laminat. Nous avons donc laminé les cellules sur des toiles de

laize moins grande. Nous évitions ainsi les différences de comportement tissu/laminat. Les parties de toiles « nues » légèrement plissées ont été recouvertes par les confections.
En attendant de trouver la solution pour obtenir des toiles comportant des cellules photovoltaïques, nous avions testé la quantité de toile à ne pas laminer pour une largeur de 640 mm de laminat. Cette largeur correspond à la largeur de laminat requise pour les lés de store camping-car.

Ainsi, pour connaître la largeur optimale de tissu à utiliser, nous avions réalisé plusieurs tests :
Lors du premier test, nous avons agrandi la préforme à laminer de façon à ce que la cote notée « a » sur la **Figure 103** ait une longueur de 315 mm. Lors du second test, cette même cote mesurait 90 mm.

Enfin, suite à ces résultats et à nos observations sur les essais précédents, nous avons laminé les cellules sur une toile de laize correspondant.

La toile utilisée pour cet essai est une toile de coloris 8206 (Bordeaux) dont les fibres composant les fils de trame et les fibres composant les fils de chaîne sont identiques.

Le premier essai nous permet de laisser 315 mm de tissu « nu » d'un coté du laminat. Nous avons observé des plis de forme elliptique après lamination sur chaque coté de la toile. Même la partie préforme laminée était marquée. La partie la plus marquée par les plis est la partie de largeur 315 mm de toile. La partie de 60 mm n'est pas plissée de la même façon : quelques plis parallèles à la trame de forme elliptique et très peu marqués sont présents.



Figure 110 : *Partie la plus marquée 315 mm de toile (face enduite)*

Le même test a été effectué sur la toile de même matricule. Les différentes couches composant la préforme laminée ont été découpées de façon à laisser 90 mm de toile sur la cote notée « a ». (Figure 103)

La Figure 111 montre les plis obtenus pour une telle largeur. De la même manière, la partie composée de 60 mm de toile est très peu marquée.



Figure 111 : *Partie la plus marquée 315 mm de toile (face enduite)*

Etant donné que les toiles sont très peu marquées par les plis sur le coté comportant 60 mm de tissu seul, la longueur de 90 mm semble être la limite supérieure pour les plis.

Pour réaliser les prototypes de camping-car en version 0, la laize choisie est de 76 cm dont 60 mm pour chacun des cotés de la préforme laminée. Les toiles laminées ne sont pas marquées avec les plis en forme d'arc de cercle. Seuls des plis elliptiques peu marqués sont recensés sur les bords de la toile. Ainsi, la première version de store camping-car a pu être réalisée.

La version 2 du store camping-car a été réalisée sur une toile assouplie par traitement sanforisage. La toile comportant la performe laminée est refroidie en sortie de lamineuse entre une table aspirante et une membrane. Ce nouveau système installé par Flexcell en début d'année 2008 permet de maintenir la toile de manière homogène tout en appliquant une température uniforme sur l'ensemble de sa surface.

Certaines précisions concernant les matériaux et leurs dimensions lors de la lamination ont été apportées lors de ces essais. Il a été remarqué que l'ETFE composant la couche superstrat ne doit pas être coupé à plus de 3 cm. L'ETFE dont les extrémités sont placées sur le tissu sans couche intermédiaire d'encapsulant est déformé sous l'effet de la chaleur (rétractation). Si la longueur est trop importante, le tissu assoupli est entrainé ce qui crée un léger pli. C'est pour cette raison que l'ETFE ne doit pas dépasser de plus de 3 cm des extrémités de la préforme laminée. Le résultat d'un des lés laminés est visible sur la Figure 112.



Figure 112 : *lamination toile sanforisée lé camping-car*

Concernant ce process, les remarques suivantes peuvent être ajoutées :

Avantages :

- ✓ Solidité du laminat aux endroits où la cellule n'est pas présente ;
- ✓ Peu de dégradation des propriétés mécaniques du tissu.

Inconvénients :

- ✓ Limite en taille du tissu à cause de la taille de la table ;
- ✓ Beaucoup de plis observés en fin de lamination ;
- ✓ Le tissu doit être sanforisé pour éviter tous les plis.

IV.1.C.c Machine continue à contact tangentiel (PowerFilm Solar®)

Ce procédé de lamination requiert l'utilisation de deux méthodes. En effet, il se décompose en deux étapes successives au cours desquelles la préforme est préparée puis laminée sur le tissu. Il se décrit de la manière suivante :

- ✓ Préparation de la préforme : Table de lamination (procédé discontinu) ;
- ✓ Lamination sur tissu : Roll-to-roll (procédé Semi-Continu).

Ce procédé de lamination est utilisé par l'entreprise PowerFilm Solar® avec qui les essais ont été réalisés au cours des années 2008 et 2009.

IV.1.C.c.i Procédé discontinu

La table à laminer de PowerFilm Solar® est différente de celle de Flexcell. Il n'y a pas de table de chargement ni de refroidissement. Avec cette table, il est possible de laminer les préformes seules, mais aussi, les préformes sur le tissu.

Les toiles laminées avec cette méthode ne nécessitent pas de traitement d'assouplissement.

Pour des raisons de confidentialité, il n'a pas été possible d'observer la table utilisée avec la même précision que la table utilisée par Flexcell®.

Tableau 15 : *Réglages machine lamination*

Paramètres	Valeurs
Température (℃)	150
Pression ()	Pas d'information
Vitesse (m/s)	0
Temps (min)	Pas d'information
Dimensions (m)	3×2
Surface (m²)	6

Avantages :

- ✓ Aucun pli observé ;
- ✓ Pas de déformation du tissu ;
- ✓ Peu de dégradation des propriétés mécaniques du tissu.

Inconvénient :

- ✓ Limite en taille du tissu à cause de la taille de la table.

IV.1.C.c.ii Procédé Semi-continu

- **Lamination de la préforme**

La lamination se fait sous vide avec le même matériel que la lamination en procédé discontinu. La température est de 120 °C pendant 35 minutes.

Une fois la préforme laminée, l'étape suivante consiste à laminer la cellule photovoltaïque sur le textile.

- **Lamination de la préforme sur textile**

Tableau 16 : *Réglages machine lamination*

Paramètres	Valeurs
Température rouleau inférieur (°C)	165,5
Température rouleau supérieur (°C)	168,3
Pression (MPa)	0,137
Vitesse (m/min)	0,30
Temps (min)	
Dimensions (m)	1,57×∞
Surface (m²)	

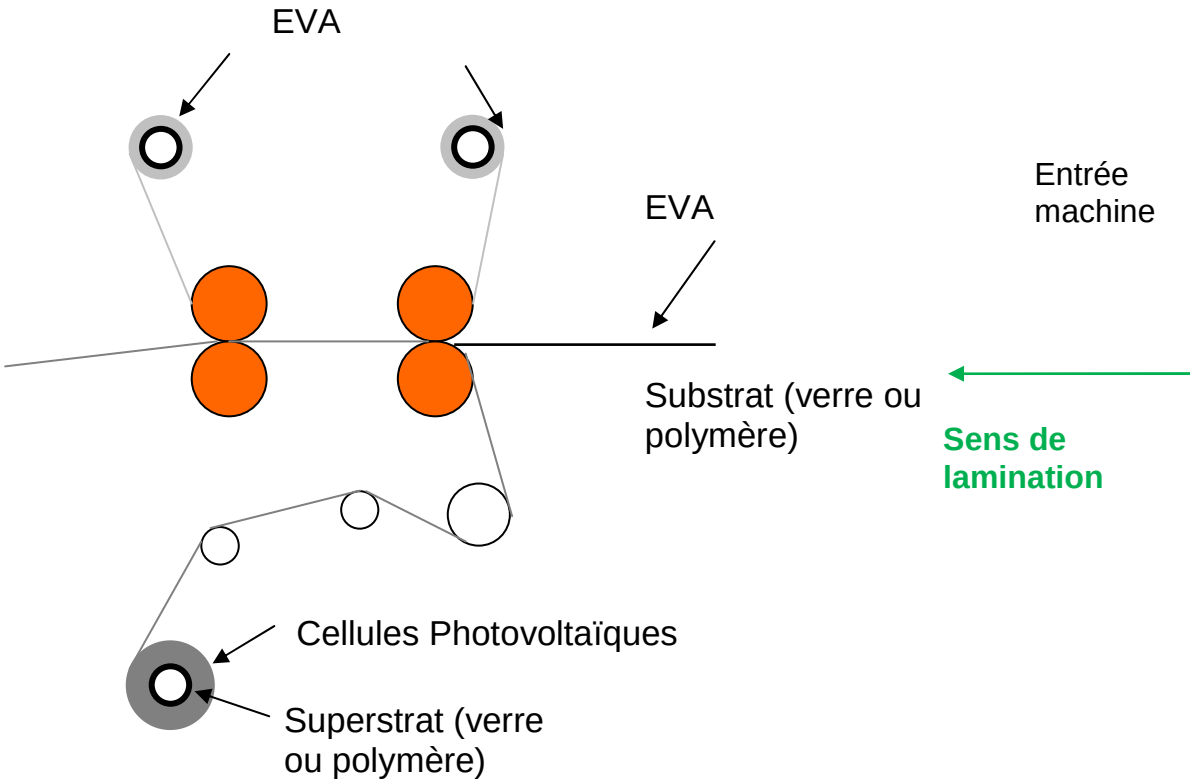


Figure 113 : *Schéma lamination atmosphérique ou continue*

IV.1.C.c.iii Composition du laminat

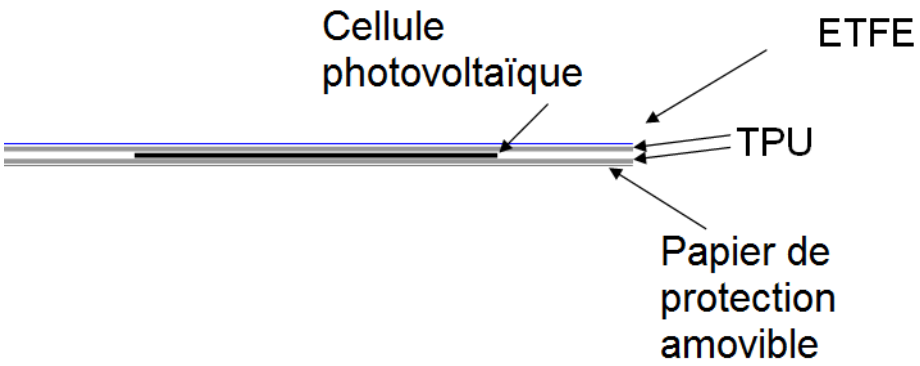


Figure 114 : *Schéma en coupe composition de la préforme laminée*

- **Décomposition du complexe laminé**

Le substrat : tissu

Le tissu est un Orchestra 50 TT, le même que celui utilisé pour les tests précédents

Les superstrats : ETFE

Le polymère utilisé pour la face supérieure de la cellule est de l'ETFE de la marque Dupont, et de modèle Tefzel 200.

L'encapsulant

L'encapsulant utilisé est du polyuréthane thermoplastique (TPU). Afin de déterminer ses caractéristiques physiques, une analyse DSC a été réalisée. (Figure 88).

Ainsi, les principales caractéristiques du TPU utilisé sont les suivantes :

- Température de transition vitreuse : 52,86 ℃ ;
- Température de fusion : 132,49℃ ;
- Température de cristallisation : 64,98℃.

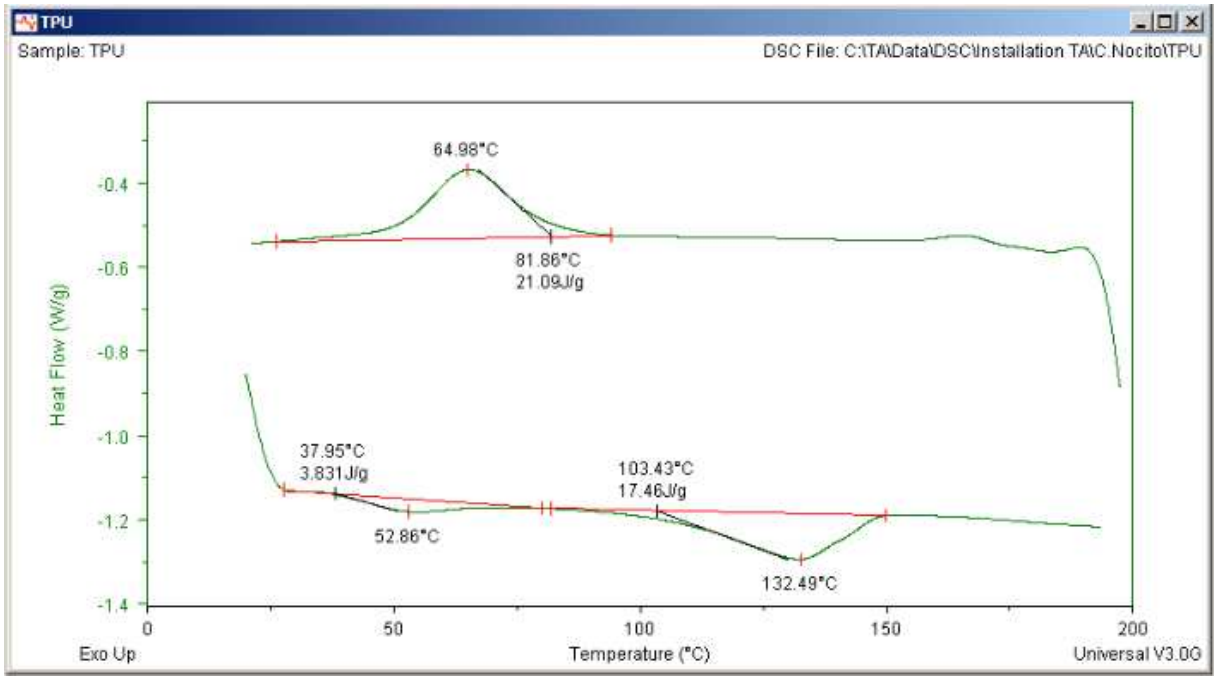


Figure 115 : *Analyse DSC du TPU Bemis*

La fiche technique du TPU utilisé pour réaliser les préformes laminées est donnée en ANNEXES.

IV.1.C.d Les différents essais

Ce procédé a été utilisé pour laminer les toiles composant le store camping-car de version 2 (duplicata de la version 2 réalisée dans un premier temps avec Flexcell®), mais aussi les toiles pour réaliser le store résidentiel de grande dimension.

Le store résidentiel de petite dimension a d'abord été réalisé selon ce procédé puis, dupliqué par lamination sous vide (procédé discontinu) avec la table de lamination. Pour des raisons de confidentialité et de similarité avec le chapitre précédent, cette méthode ne sera pas décrite. Seuls les résultats pourront être commentés.

IV.1.C.d.i Dégradation tissu

Tableau 17 : *Description des échantillons*

Désignation	Laize (cm)	Méthode de lamination	Description
Lé 1	120	Continue ("Roll-to-roll")	Lé latéral droit selon le modèle de store camping-car de version2
Lé 2	150	Continue ("Roll-to-roll")	Lé central selon le modèle de store camping-car de version 2
Lé 3	120	Continue ("Roll-to-roll")	Lé latéral gauche selon le modèle de store camping-car de version 2
50×50	50	Sous vide	Carré laminé + tissu de dimension 50×50 cm

Le lé 2 a été difficile à réaliser à cause des problèmes de glissement du laminat. Pour cette raison, la préforme laminée a été réalisée en 2 fois avec un espace de 1 cm entre les 2 groupes de cellules.
Le tableau avec les figures résumant les caractéristiques techniques des dégradations de tissu est donné en Annexes.

Remarque : Echantillon neutre signifie qu'il n'a pas subi de lamination. L'échantillon désigné 50x50 représente l'échantillon laminé en discontinu.

La masse surfacique de l'échantillon « Lé 2 » est bien supérieure à celle des autres échantillons.

Le Schmerber de l'échantillon « lé 2 » est plus petit. Lors des derniers essais sur toile laminée en discontinu, la colonne d'eau pouvait être proche de 600 mm.

La résistance à la rupture n'est pas diminuée sur les tissus laminés. La lamination n'a pas trop d'influence sur l'allongement. La résistance à la déchirure amorcée est diminuée pour l'échantillon laminé sous vide.

Au vu des écarts de couleurs observés sur le lé 2, on peut penser que les conditions de lamination (bien différentes de celles des 2 autres) ont dégradé le tissu.

Lamination continue des lés du modèle conçu pour le store résidentiel

Lors de ces essais, il a été remarqué que la largeur importante de laminat (7,5 cm de chaque coté de la cellule) entraîne une formation de plis sur cette partie. Plusieurs facteurs peuvent en être la cause :

- température trop élevée de la machine,
- différences entre la partie de préforme composée de TPU et d'ETFE et celle composée de TPU, d'ETFE et de cellules,
    - rigidité,
    - épaisseur.

Chacune de ces hypothèses peut être la cause du défaut observé. Il est aussi possible que ce problème résulte de la combinaison de celles-ci.

Nous avons seulement vérifié la véracité de l'hypothèse mettant en cause la différence de comportement des parties de préforme avec et sans cellule. En effet, changer seulement la température risquerait d'influer sur les deux autres paramètres (pression et vitesse). Pour des raisons liées au temps alloué aux essais, il n'a pas été possible de valider la cohérence de cette hypothèse.

Pour résoudre ce problème et réaliser les préformes requises pour les essais suivants, seule l'influence de l'épaisseur et de la rigidité de la cellule a été traitée. La partie de préforme ne comportant pas la cellule photovoltaïque a été compensée par un papier adhésif en polyamide résistant aux hautes températures.

Une préforme de petite dimension a d'abord été réalisée. L'un des deux cotés de cette préforme est recouvert de l'adhésif compensateur tandis que l'autre non.

Le résultat de cet essai est visible sur la Figure 116.

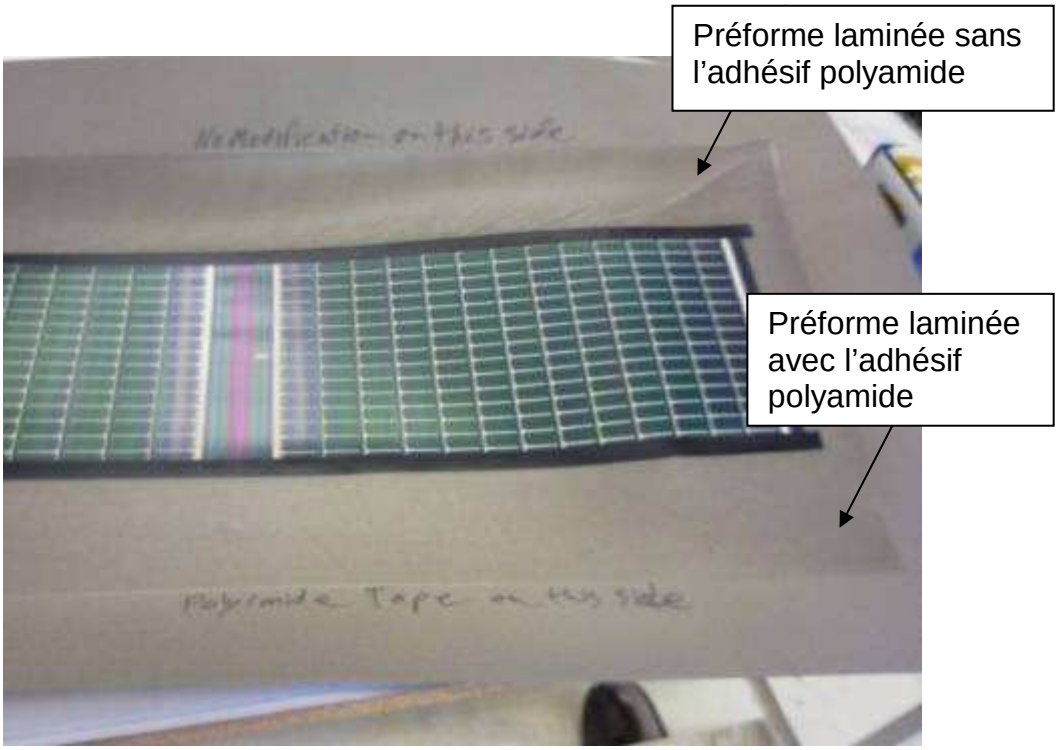


Figure 116 : *Comparaison entre le bord de la préforme avec et sans adhésif*

Le résultat esthétique montre que la préforme ainsi laminée ne plisse pas. Cependant, l'adhésif posé marque la préforme. Chaque impureté ou juxtaposition imprécise est visible.

Toutefois, les lés destinés à réaliser les prototypes de stores résidentiels ont été réalisés de cette manière.

L'absence de moyens quantifiables sur place lors de l'essai n'a pas permis de mesurer précisément que la préforme ainsi laminée a la même adhérence que les autres préformes laminées sans adhésif.

L'ajout de matière permet d'augmenter la pression sur la préforme. Même si l'influence de la conductivité thermique de l'adhésif peut être importante, cette solution adhère correctement au tissu.

IV.1.C.d.ii Déformation géométrique du tissu

Un autre défaut a été remarqué concernant ce type de lamination. En effet, suite à un essai de montage du store (test de mesure Harol), nous avons remarqué que la toile avait des défauts géométriques et de ce fait ne pouvait être roulée sur son support d'enroulement de façon correcte. Dans le but d'appréhender le procédé de lamination, l'analyse géométrique de chacune des pièces laminées a été réalisée.
Ceci afin de fixer une tolérance à respecter lors de chacune des étapes de fabrication du store photovoltaïque.

Pour ce faire, des mesures de déformations de toiles ont été effectuées afin de connaître l'influence des erreurs lors de chaque process. Dans un premier temps, seuls les lés laminés de secours ont été mesurés, puis, le store confectionné a entièrement été mesuré.

Ensuite, la largeur des lés a été mesurée, en supposant la déformation symétrique par rapport à l'axe central de la toile.
Afin de vérifier cette hypothèse, un dispositif de mesure a été créé (Figure 117) : le principe étant de mesurer les valeurs algébriques de la déformation de la toile par rapport à deux droites fixes et parallèles entres elles et dont l'origine est placée à l'angle de la toile. Les mesures sont effectuées de manière régulière tous les 20 cm.

Remarque : Le premier point ne doit pas être pris en compte : lors de la mesure, ce côté est mis dans une pince légèrement en tension ce qui entraîne un élargissement.

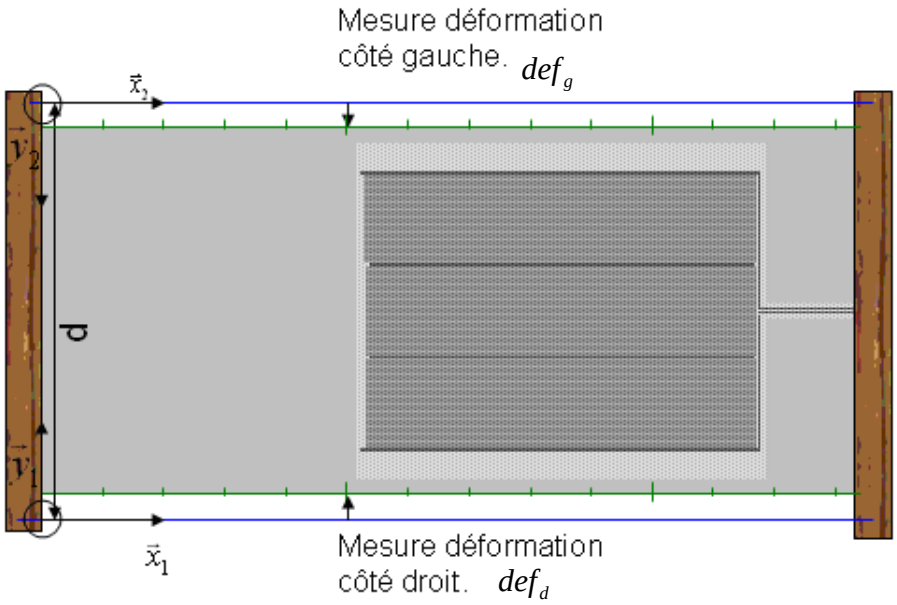


Figure 117 : *Représentation du dispositif de mesure*

Calcul de la largeur d'un lé

On note d la longueur séparant les deux fils (en bleu sur la Figure 117) en tout point du dispositif, def_d la déformation de la laize droite par rapport au fil de mesure droit et au repère (1) et def_g la déformation de la laize gauche par rapport au fil de mesure gauche et au repère (2).

$$L = d - \left(def_g + def_d\right)$$

Calcul du Δ

Les mesures faites sont espacées de 20 cm. La mesure étant très petite devant la grandeur de chaque lé, on suppose qu'entre chaque mesure, la déformation est une droite d'équation $y = ax + b$.

Le Δ calculé représente le coefficient directeur de la droite dont l'unité correspond à une graduation (une unité = 20 cm)
Cela permet de voir la position d'un point par rapport au précèdent :

$$\Delta = y_i - y_j \qquad \text{Avec } j - i = 1$$

Les éprouvettes mesurées sont des lés de tissu sur lesquels les préformes photovoltaïques sont positionnées au même endroit. Ceux-ci sont différenciés par la méthode de lamination ou encore la date à laquelle ils ont été réalisés.
Les mesures ont été réalisées sur 5 lés et un store confectionné. Les désignations des éprouvettes sont les suivantes :

Lé 1 : méthode semi-continue,
Lé 2 : méthode semi-continue,
Lé 3 : méthode sous-vide,
Lé 4 : méthode semi-continue,
Lé 5 : méthode semi-continue.

Tous les résultats de mesure sont donnés en ANNEXES.

Store test : Store confectionné décrit au chapitre précédent.

- **Lé 1**

Description

Lé laminé de façon semi-continue, plissé sur la droite. Ce laminat a été réalisé semaine 31 année 2008 lors de ma visite chez PowerFilm Solar®.

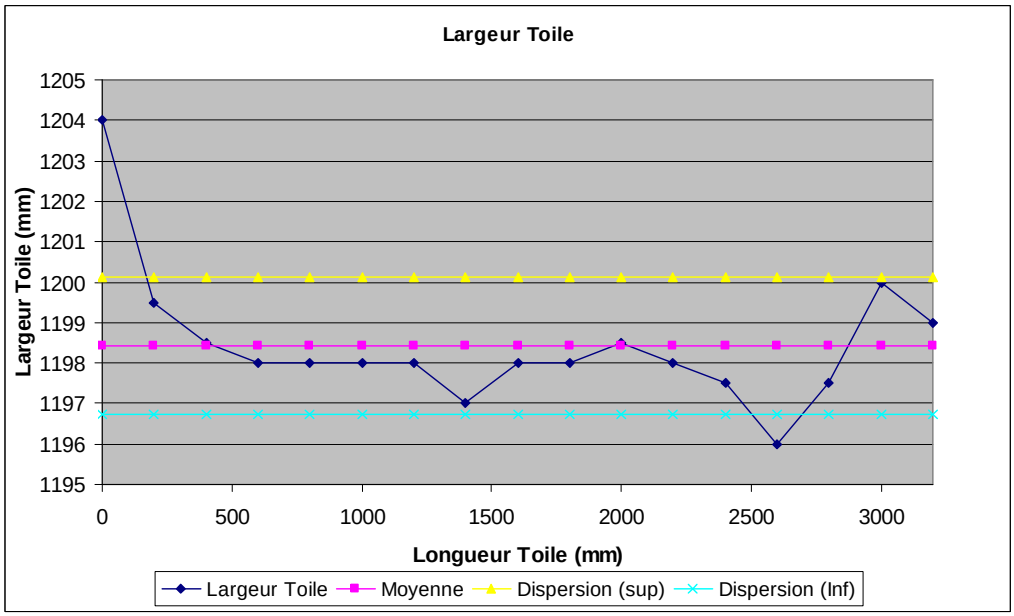


Figure 118 : *Largeur Toile selon les valeurs du Tableau F (ANNEXE)*

Observations

Le lé est déformé de façon quasiment parallèle, la déformation suit une courbe dont le point d'inflexion se situe à la hauteur du quart de la cellule photovoltaïque.
Le Tableau G ANNEXE montre que le lé 1 se déforme de façon significative à la mesure 6 (longueur 1200 – 1400 mm) (au quart de la lamination de la cellule). Sur le côté droit, la déformation s'arrête en fin de lamination de cellule contrairement au côté gauche.
De manière générale, le côté gauche est plus déformé que le côté droit.
De plus, la largeur reste constante sur toute la longueur de la toile : hormis le premier point, seul un point sort de l'intervalle de confiance (le coefficient de variation est de 0.14%).

- **Lé 2**

Description

Lé laminé de façon semi-continue, non plissé. Ce laminat a été réalisé après la semaine 31, année 2008.

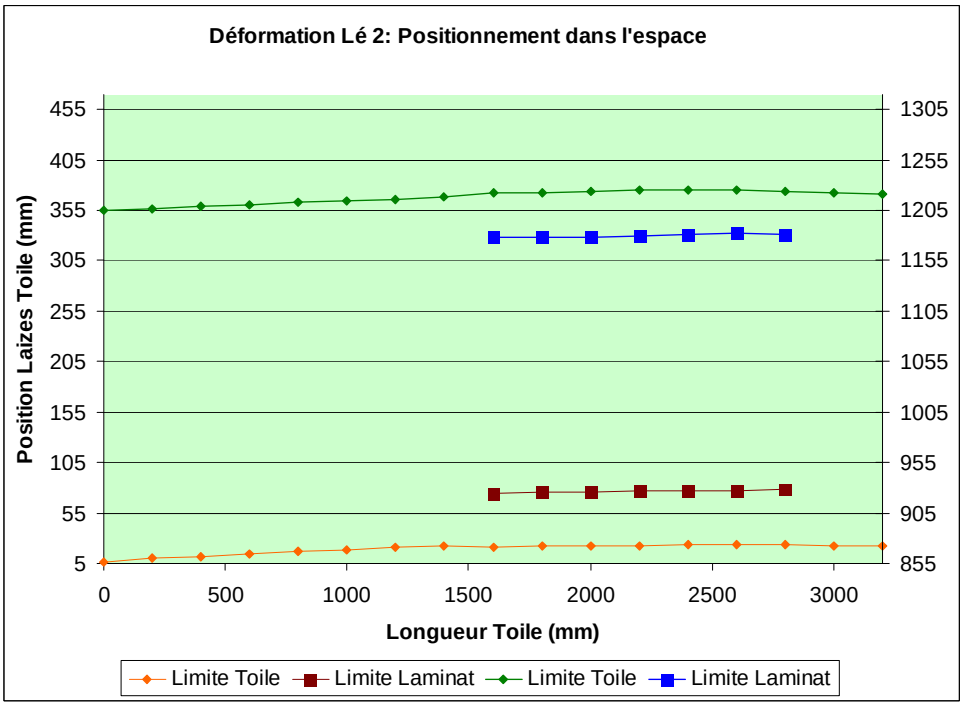


Figure 119 : *Représentation déformation du lé 2 selon les valeurs du Tableau H (ANNEXE)*

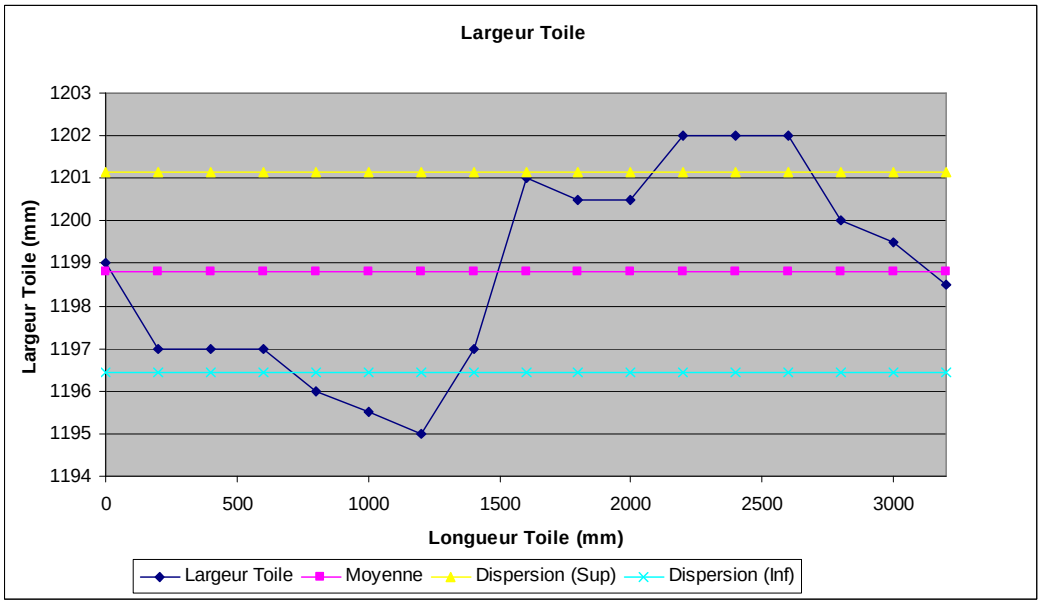


Figure 120 : *Largeur toile selon les valeurs Tableau I (ANNEXE)*

Observations

Tout comme le lé 1, le lé 2 est déformé de façon quasiment parallèle. Le sens de la déformation est le même que celui du lé précédent. La déformation commence à la cellule photovoltaïque.
Sur le côté gauche, la déformation n'est pas importante jusqu'à la mesure 5. Son point d'inflexion se situe en mesure 7 qui correspond au début de la lamination puis, on observe quasiment une droite. Le même phénomène est observé sur la laize droite excepté que celle-ci continue à se déformer jusqu'à la fin de la dépose de la

cellule. Concernant la largeur du lé, on observe que celle-ci augmente à l'endroit où il y a la cellule. Cependant, bien qu'il y ait beaucoup de points en dehors de l'intervalle de confiance, le coefficient de variation reste faible.

- **Lé 3**

Description

Lé laminé sous table, non plissé. Ce laminat a été réalisé avec le procédé sous vide avant les essais effectués lors de la semaine 31, année 2008.

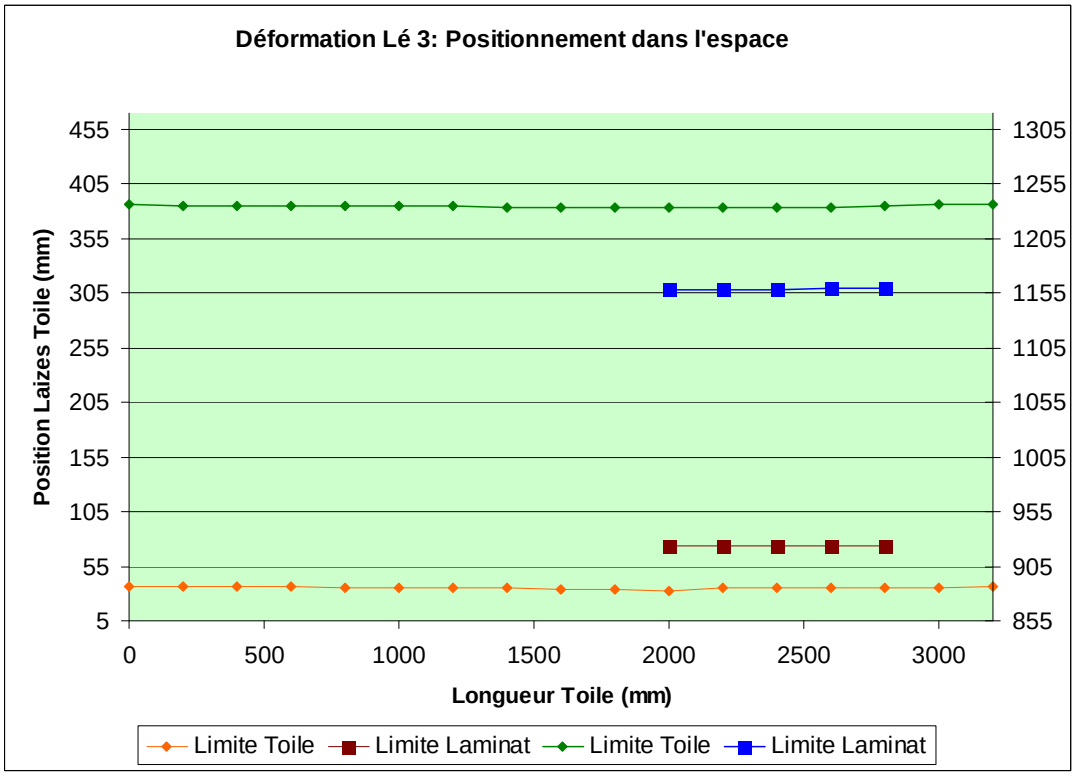


Figure 121 : *Représentation déformation du lé 3 selon les valeurs du Tableau J (ANNEXE)*

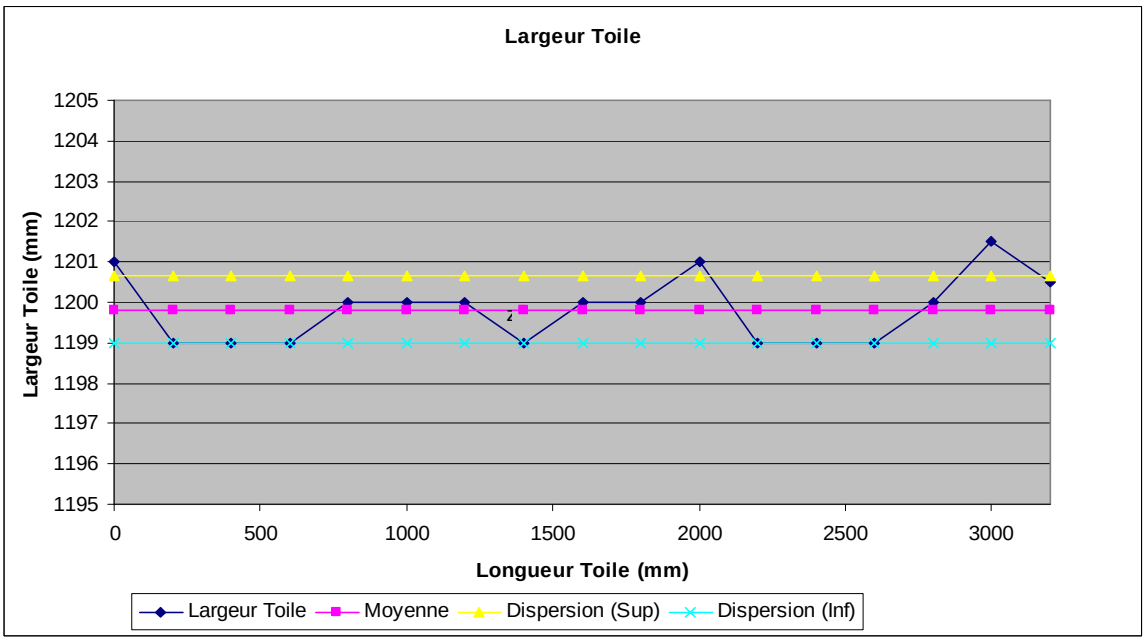


Figure 122 : *Largeur toile selon les valeurs du Tableau K (ANNEXE)*

Observations

Aucune déformation notable n'est observée, la largeur du lé est constante et le coefficient de variation est très inférieur à celui des lés 1 et 2.

- **Lé 4**

Description

Lé laminé de façon semi-continue. C'est un laminat sans plis avec une mauvaise adhérence. Celui-ci a été réalisé après les essais de la semaine 31 de l'année 2008.

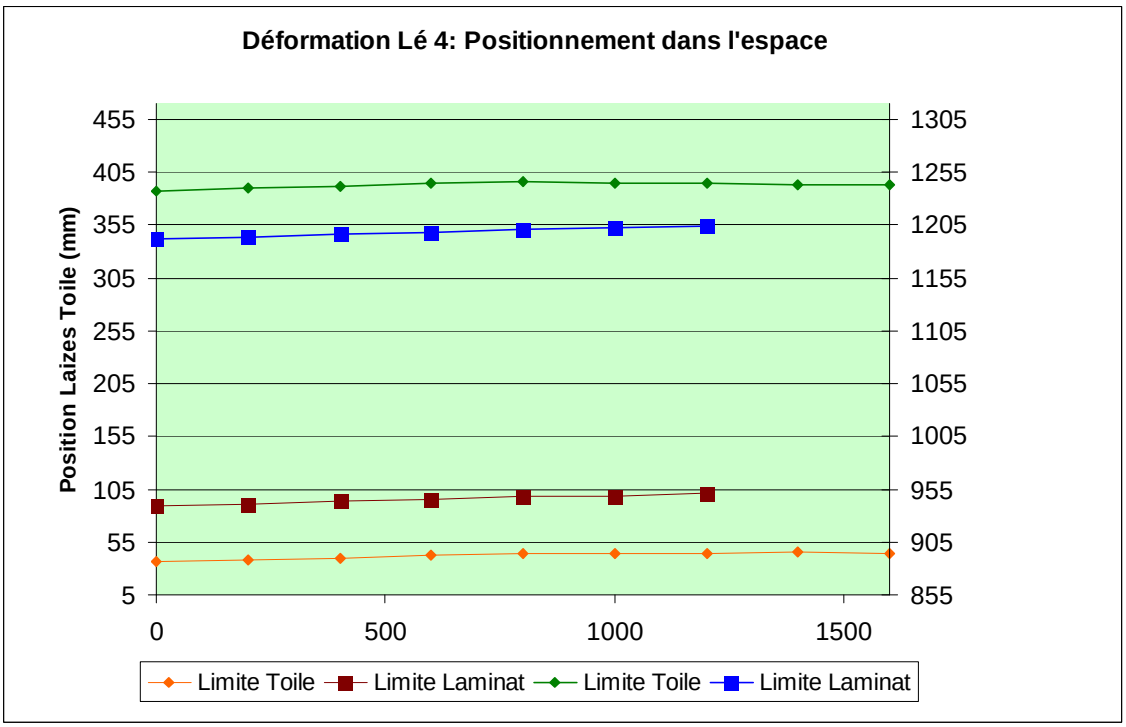


Figure 123 : *Représentation déformation du lé 4 selon les valeurs du Tableau L (ANNEXE)*

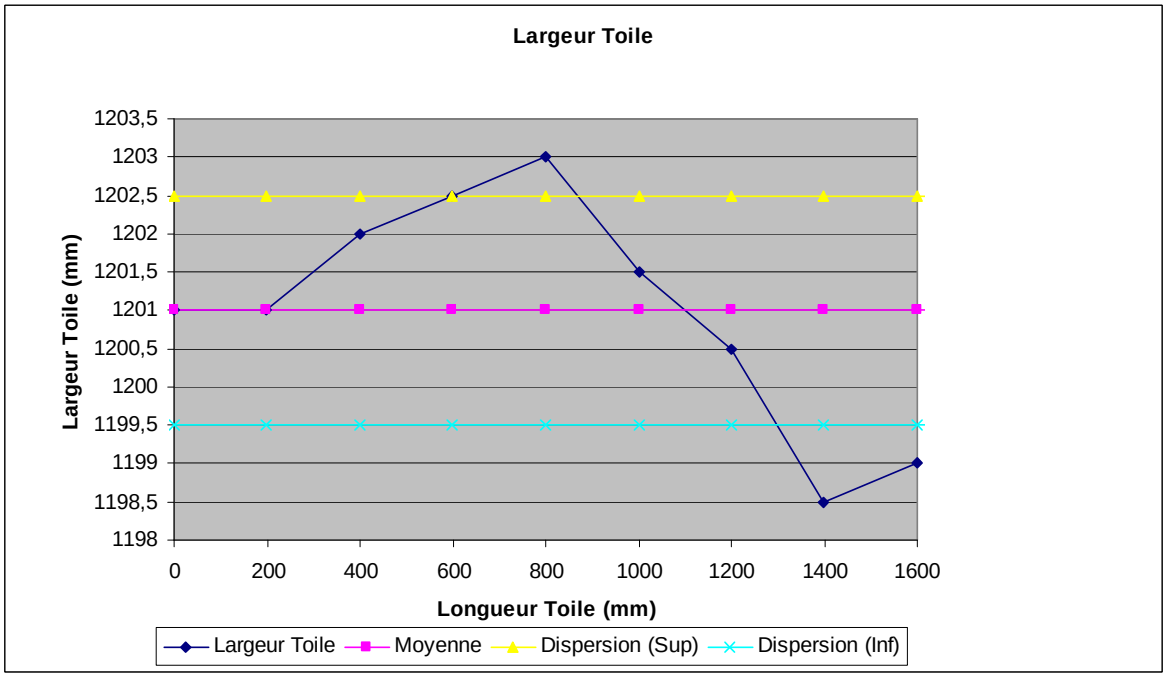


Figure 124 : *Largeur toile selon les valeurs du Tableau M (ANNEXE)*

Observations

Le lé 4 est déformé de façon quasiment parallèle. Le sens de la déformation est le même que celui des lés précédents. La déformation n'est pas très importante des 2 côtés jusqu'au point 4 (moitié de la cellule). Du côté gauche, on a une droite jusqu'à la fin de la lamination tandis que du côté droit, la déformation reste relativement

importante. Concernant la largeur du lé, on observe que celle-ci augmente à l'endroit où la déformation se produit.
L'amplitude est tout de même très faible (4 mm) et le coefficient de variation reste lui aussi très faible (<1%).

- **Lé 5**

Description

Lé laminé de façon semi-continue, non plissé. Ce laminat a été réalisé après la semaine 31, année 2008.

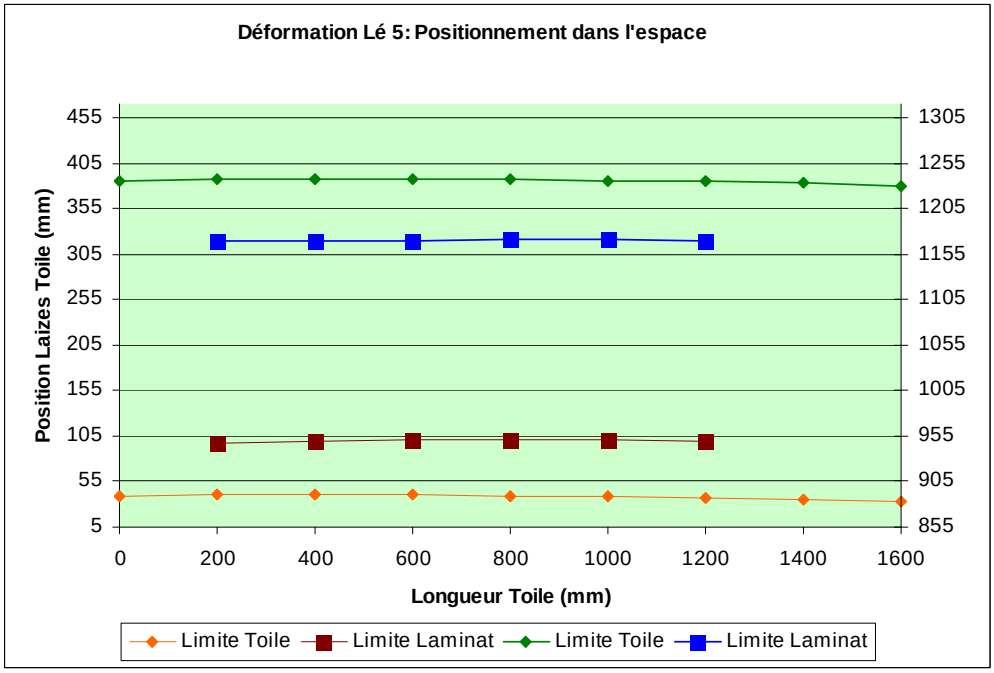


Figure 125 : *Représentation déformation du lé 4 selon les valeurs du Tableau N (ANNEXE)*

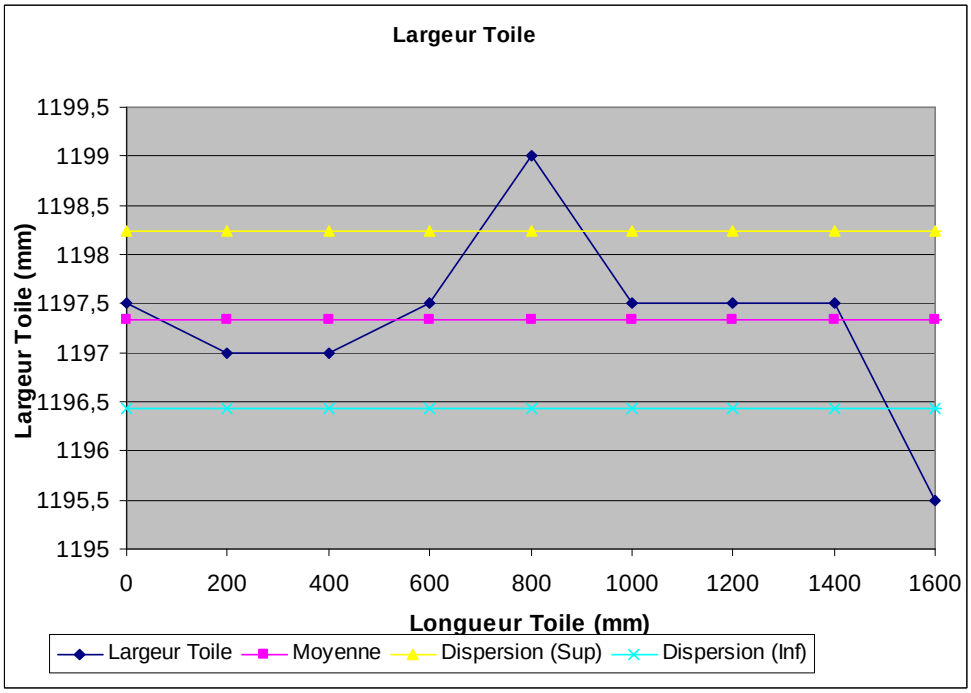


Figure 126 : *Largeur toile selon les valeurs du Tableau O (ANNEXE)*

Observations

La déformation est similaire des deux côtés. La courbe de déformation est inférieure à celles observées sur les lés précédents. On observe sur les 2 laizes une forte déformation à la moitié de la cellule, puis du côté gauche on a une droite jusqu'à la fin de la lamination puis encore une déformation. Sur le côté droit, la laize se déforme de façon régulière du milieu de la lamination jusqu'au bout du lé.
Enfin, la largeur est constante, elle atteint son maximum au milieu de la cellule photovoltaïque. Le coefficient de variation est encore très faible ainsi que son amplitude.

- **Store Test**

Largeur des lès composants le store

Les mesures pour obtenir la largeur des lés ont été réalisées en 2 étapes. Tout d'abord, sur l'envers, tous les 20 cm le long de la projection la distance entre les extrémités de chaque lé juxtaposé (entre 2 assemblages) a été mesurée, puis sur la même opération a été répétée sur l'endroit. (Figure 127).
Par exemple, la largeur du lé 1 est égale à (a-b). (Figure 127).

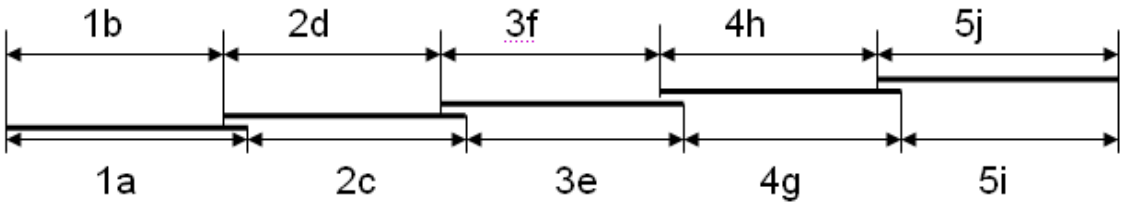


Figure 127 : *Mesure des différents lés*

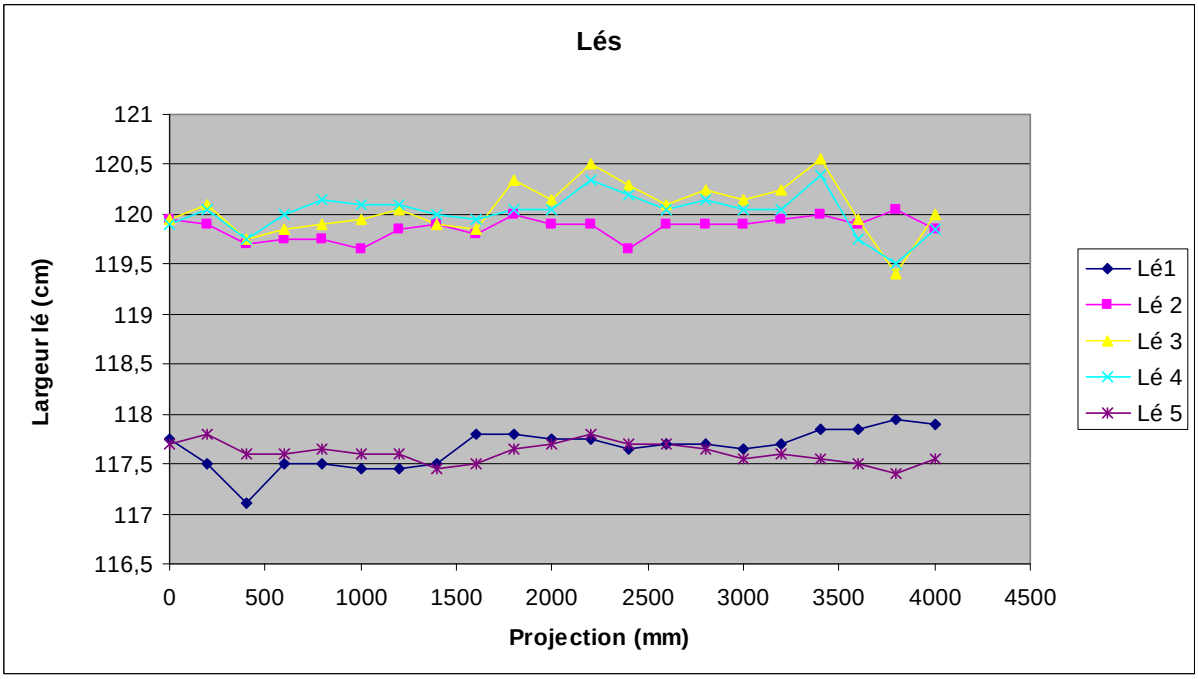


Figure 128 : *Largeur des lés selon les valeurs du Tableau P (ANNEXE)*

Les lés ont une largeur constante dont la moyenne est proche de 120 cm (lés centraux). Pour les extrémités, la moyenne de la largeur devrait être de 117.5 cm. Dans les deux cas, la moyenne est légèrement supérieure. De plus, on s'aperçoit que le lé 3 est le plus large, ceci peut être dû au cumul d'erreurs de mesures.

Les ourlets et raccords de toile

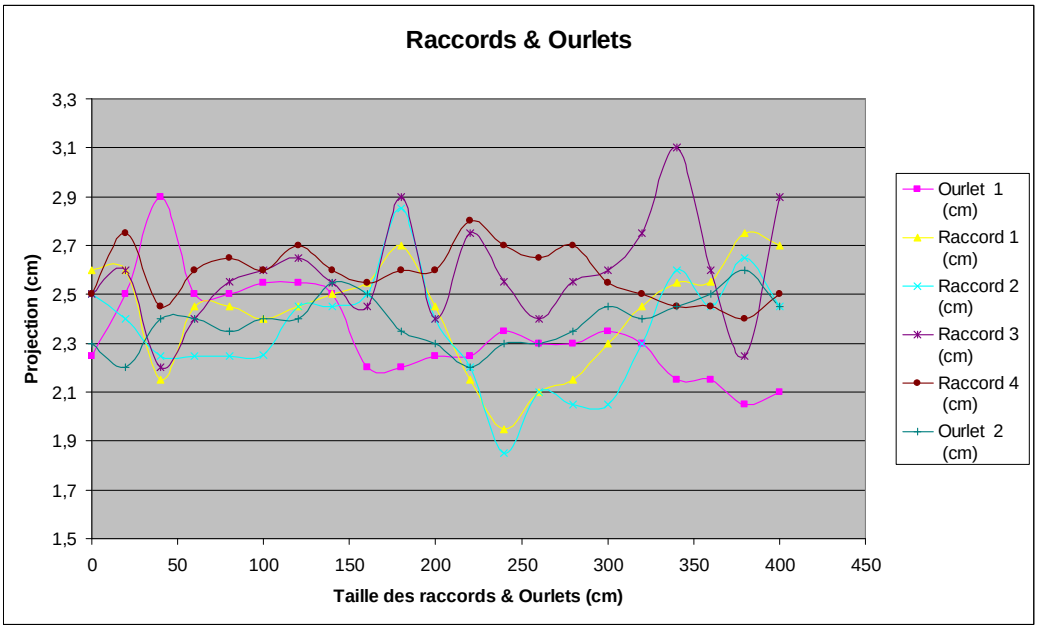


Figure 129 : *Variation de dimension des raccords de toile et ourlets sur le store. (Valeurs* Tableau Q *ANNEXE)*

Observations

On observe une forte variation des raccords et ourlets ce qui montre la difficulté rencontrée lors de l'assemblage.

- **Ensemble de la toile de store**

Déformation des extrémités

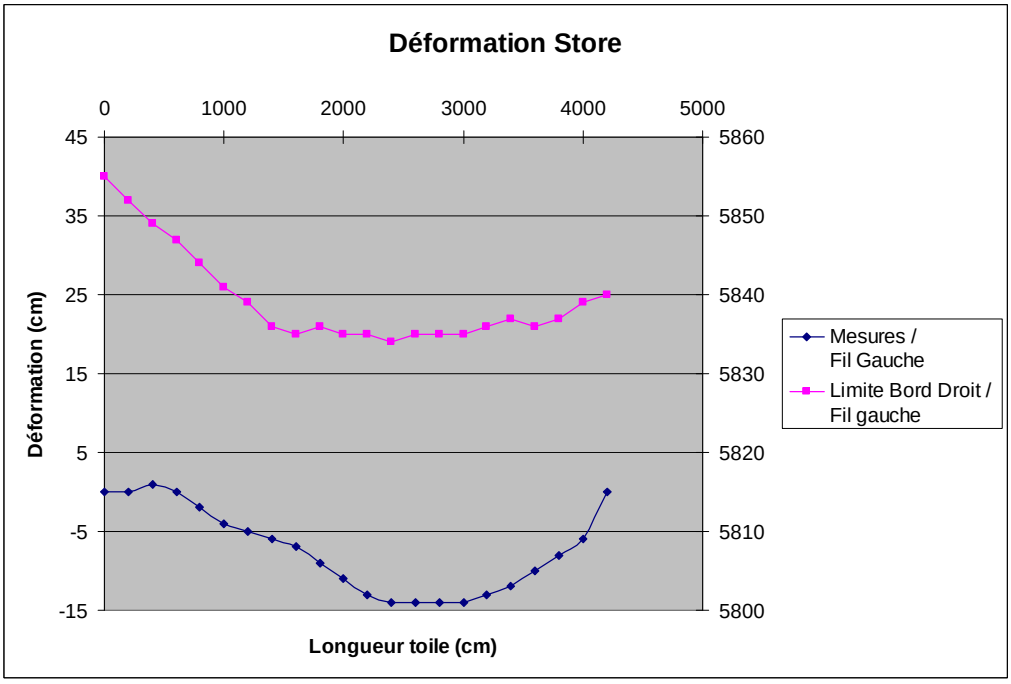


Figure 130 : *Représentation déformation des extrémités du store selon les valeurs du Tableau R (ANNEXE)*

Les mesures ayant été réalisées sur l'envers, contrairement aux mesures faites sur les lés seuls, on observe que le sens de la déformation est le même.

Les cellules photovoltaïques étant positionnées entre 1530 et 4000 mm (axe des abscisses), on remarque que la déformation est accentuée à cet endroit, la forme est une courbe dont le point d'inflexion se situe entre le premier tiers et la moitié de la cellule.

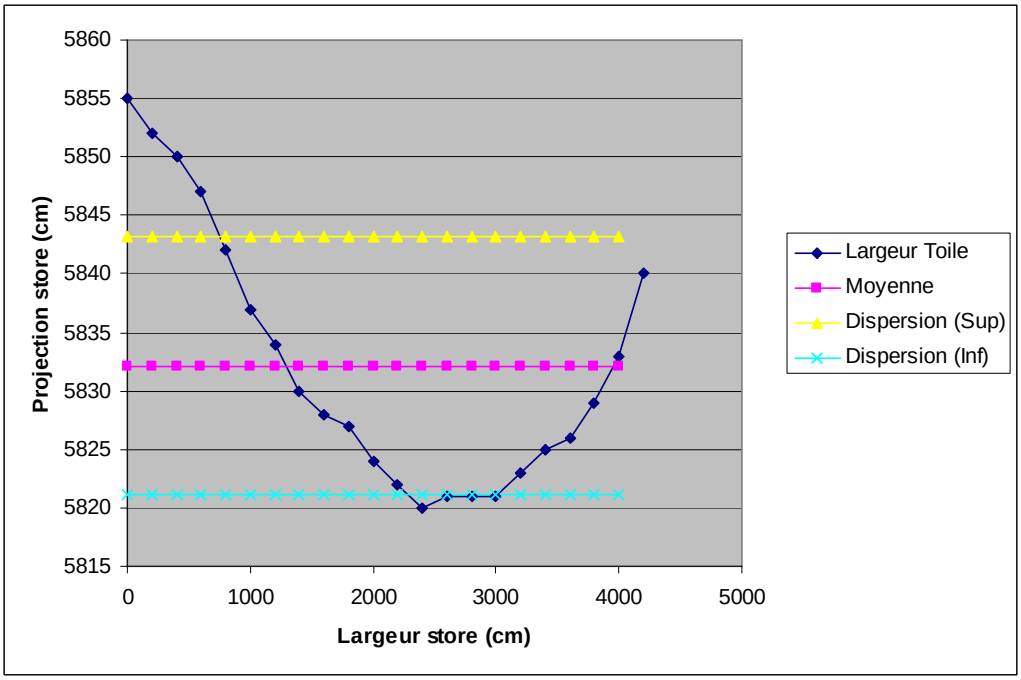


Figure 131 : *Largeur toile selon les valeurs du Tableau R (ANNEXE).*

Concernant la largeur du store, on remarque que celle-ci est très variable (son amplitude est de 35 mm), elle résulte directement des déformations qui ont influencées la taille des ourlets et des recouvrements des raccords de lés.

- Conclusion concernant la déformation

L'hypothèse d'une déformation symétrique par rapport à l'axe central de la toile n'est pas vérifiée. On s'aperçoit que les laizes de la toile restent quasiment parallèles et se déforment suivant une courbe dont l'inflexion se situe au niveau de la cellule. Ces défauts entraînent des difficultés lors de l'assemblage et le résultat obtenu est directement lié à leur accumulation.
Pour améliorer notre toile assemblée, il est impératif d'agir sur le procédé défaillant car on remarque que la forme et les fortes variations de longueur de la toile expliquent la raison des difficultés rencontrées lors du montage du store.

La toile laminée sur table n'a pas ce défaut puisqu'elle est quasiment sans plis. En comparant avec les résultats obtenus lors des laminations chez Flexcell® où les plis étaient importants mais formés symétriquement, on peut supposer que les paramètres du process agissant sur la lamination soient identiques.
Les causes de ces défauts peuvent donc être directement liées à une disparité des paramètres lors du process de lamination. En effet, la déformation étant de même forme, les hypothèses suivantes peuvent être formulées :

- laizes non perpendiculaires aux rouleaux de lamination (Figure 132),
- pression sur tissu non homogène (donc vitesse & tension non identiques, glissement tissu…) (Figure 133),
- température du rouleau non homogène sur toute sa longueur,
- flexion d'un des rouleaux donc pression, température & vitesse non homogènes, si le tissu n'est pas centré (Figure 133),

- flexion des 2 rouleaux donc déformation du tissu (Figure 135).

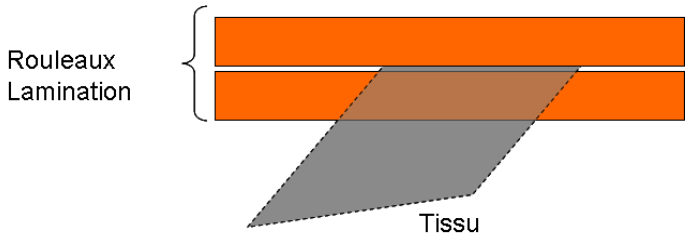


Figure 132 : *Laizes non perpendiculaires aux rouleaux de lamination*

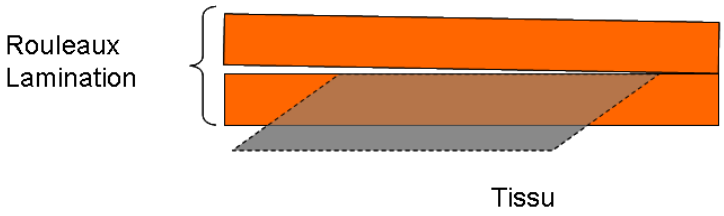


Figure 133 : *Pression différente sur le tissu*

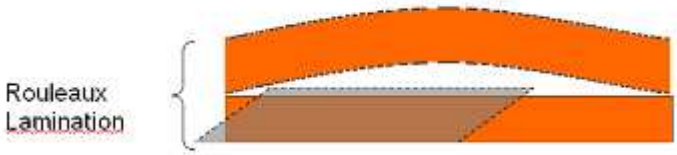


Figure 134 : *Flexion d'un des rouleaux*

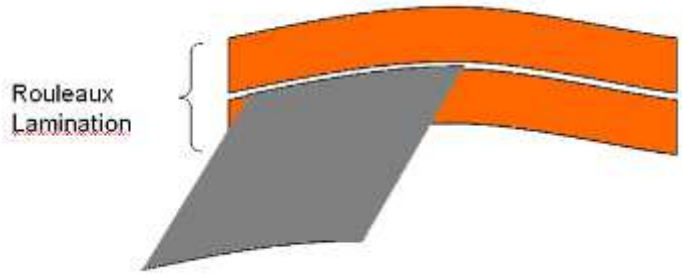


Figure 135 : *Flexion des rouleaux*

Conclusion concernant cette méthode de lamination

Avantages :

- ✓ Procédé qui permet de laminer des grandes tailles de tissu ;
- ✓ Plus flexible au niveau industrialisation.

Inconvénients :

- ✓ Déformation possible du tissu ;
- ✓ Solidité du laminat ;
- ✓ Problème de différence de rigidité des matériaux.

IV.1.C.e Technologie développée - contribution scientifique

Suite aux différents essais réalisés précédemment, nous avons décidé de développer notre processus de lamination afin de palier à tous les problèmes rencontrés précédemment chez les fournisseurs. De plus, comme nous l'avons expliqué, il a été difficile de travailler et de modifier les lamineuses ne nous appartenant pas. L'entreprise Dickson-Constant a investi dans une machine de lamination que nous avons pu adapter et modifier. Celle-ci est différente des machines étudiées au cours des chapitres antérieurs. Le choix de cette machine a été orienté par les essais et nos conclusions précédentes. Le contact tangentiel ne permet pas de laminer précisément les préformes et la lamination sous-vide dégrade fortement l'aspect du tissu. Cette calandre à tapis semble être un bon compromis entre ces deux technologies.
Description de la technologie utilisée

La technologie utilisée est décrite sur la Figure 136. Des modifications importantes doivent être effectuées :

- modification du trajet du tapis,
- installation de tables pivotantes en entrée et sortie de machine.

Dans un premier temps, pour faciliter et améliorer la production, plusieurs modifications légères et moins onéreuses ont été mises en place (Figure 137 et Figure 138).

- Une toute première modification n'entraînant aucun aménagement matériel concerne la méthode et précisément le trajet du tissu.

Pour éviter de donner à l'ensemble tissu + cellule une courbure trop importante qui tend à décoller la cellule lorsqu'elle est encore chaude, on peut éviter de suivre le tapis et sortir en contournant la calandre même si celle-ci n'est pas utilisée et se trouve en position relevée.

- Déplacer la zone de positionnement de la cellule sur le tissu pour la situer sur une table horizontale qui peut éventuellement comporter des accessoires pour la dépose et l'accroche préalable de la cellule.

- Créer une zone tampon entre la zone de positionnement et l'entrée dans la machine afin de pouvoir observer, contrôler et éventuellement intervenir avant que la matière ne soit plus accessible (voir les plans qui suivent).

Si l'on n'utilise pas de moyen de « préfixation » de la cellule, il peut être utile d'installer dans cette zone une série de rouleaux presseurs qui emmèneraient la cellule à la même vitesse que le tissu et permettraient de conserver le positionnement désiré.

Ces transformations sont réalisables rapidement mais nécessitent que le processus de lamination soit défini et que les matières utilisées soient connues.

Tout comme pour les technologies précédentes, il est possible de citer les paramètres influents :

Tableau 18 : *Réglages machine lamination*

Paramètres	Valeurs
Température cylindre chauffant (℃)	Ambiante-210 ℃
Pression tapis(MPa)	Maximum 0,8
Pression cylindre presseur (MPa)	Poids cylindre -0,8
Vitesse (m/min)	0-10
Dimensions (m)	1,75×∞
Surface (m²)	

Lamineuse & Table d'entrée

En l'état actuel

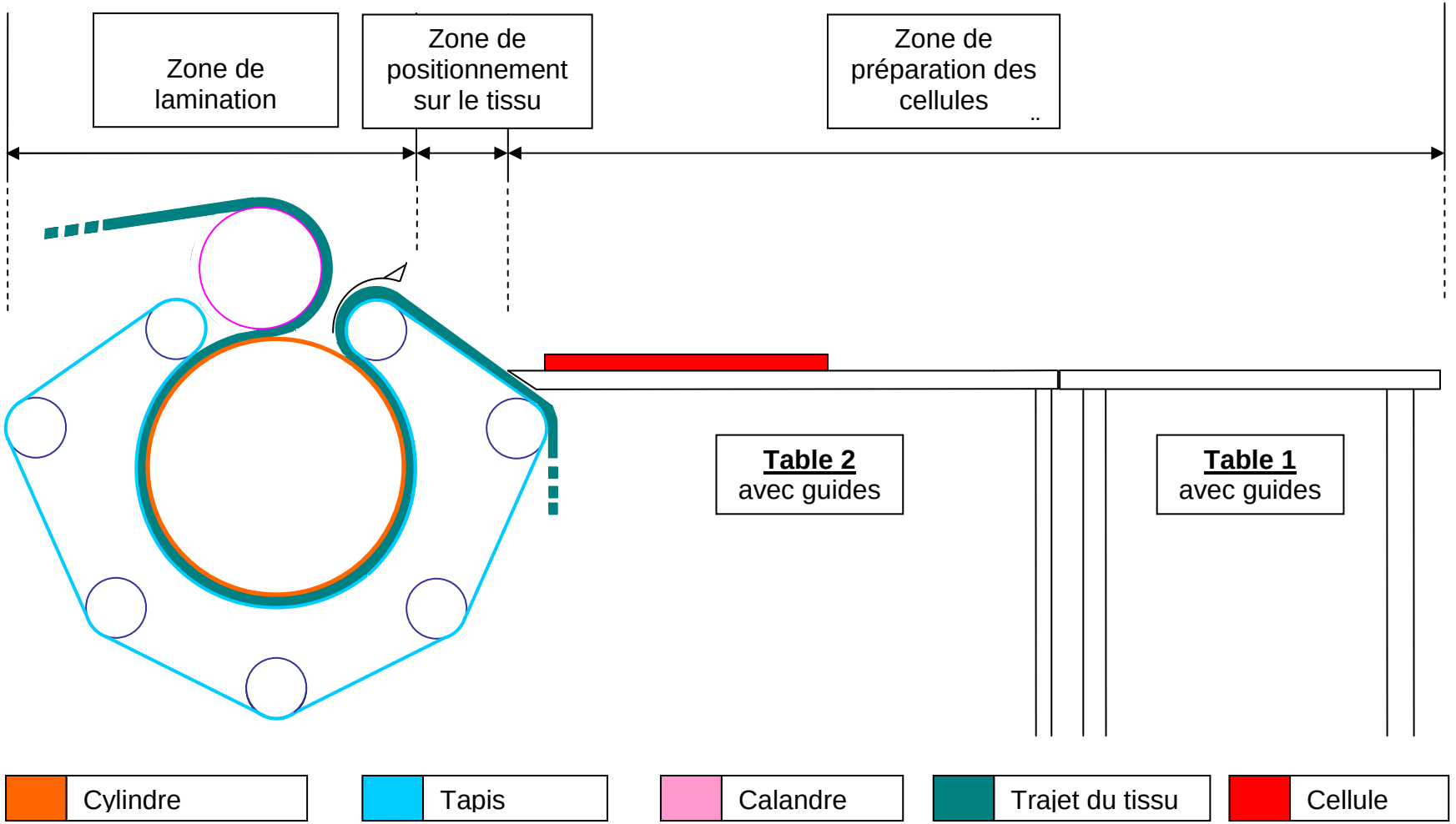


Figure 136 : *Machine de lamination Dickson-Constant*

Lamineuse & Table d'entrée

Avec modifications de mise en œuvre pour une solution sans « pré-collage »

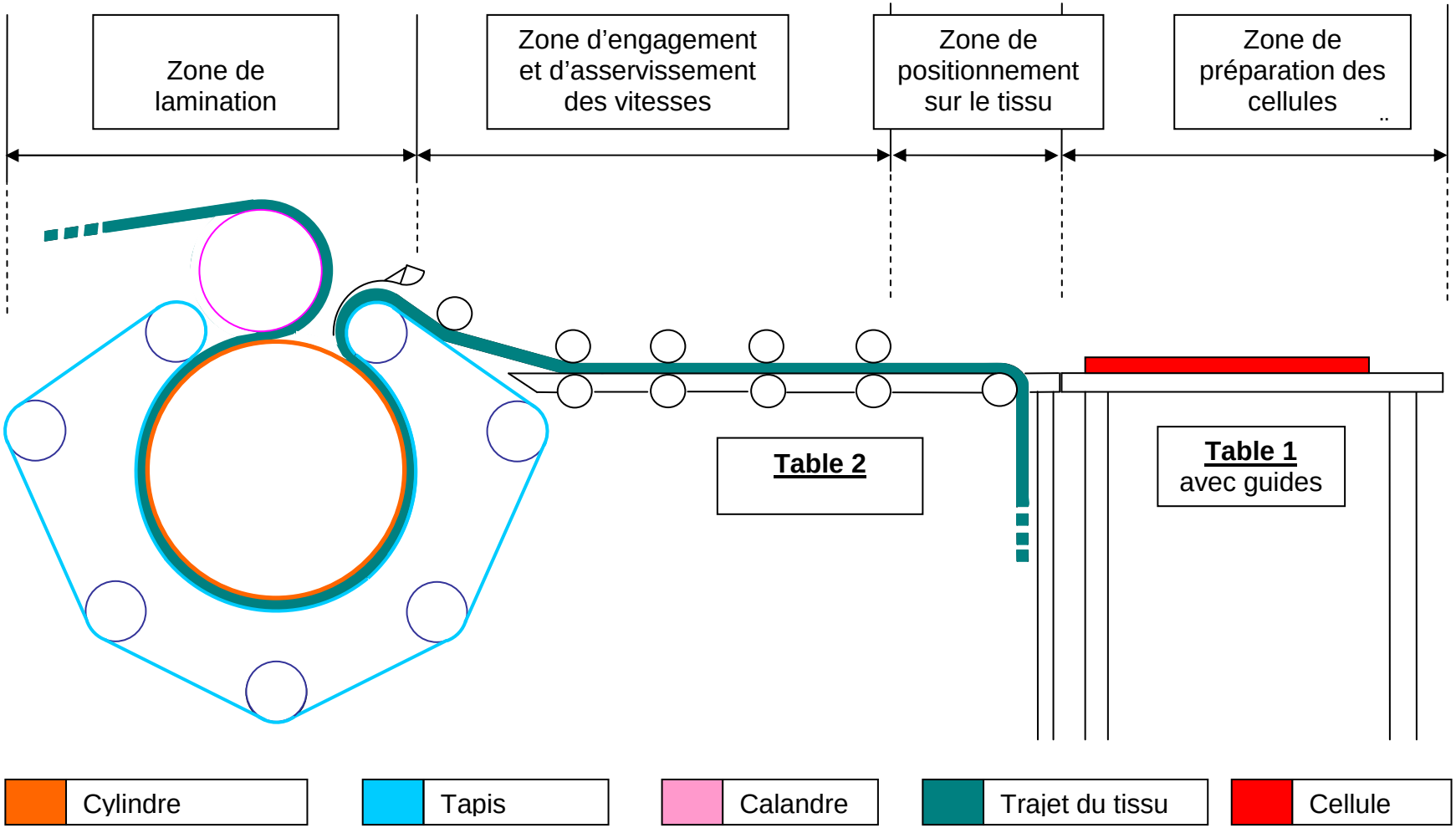


Figure 137 : *Machine d'origine de lamination Dickson-Constant et installation de table d'entrée*

Lamineuse & Table d'entrée

Avec modifications de mise en œuvre pour une solution avec « pré-collage »

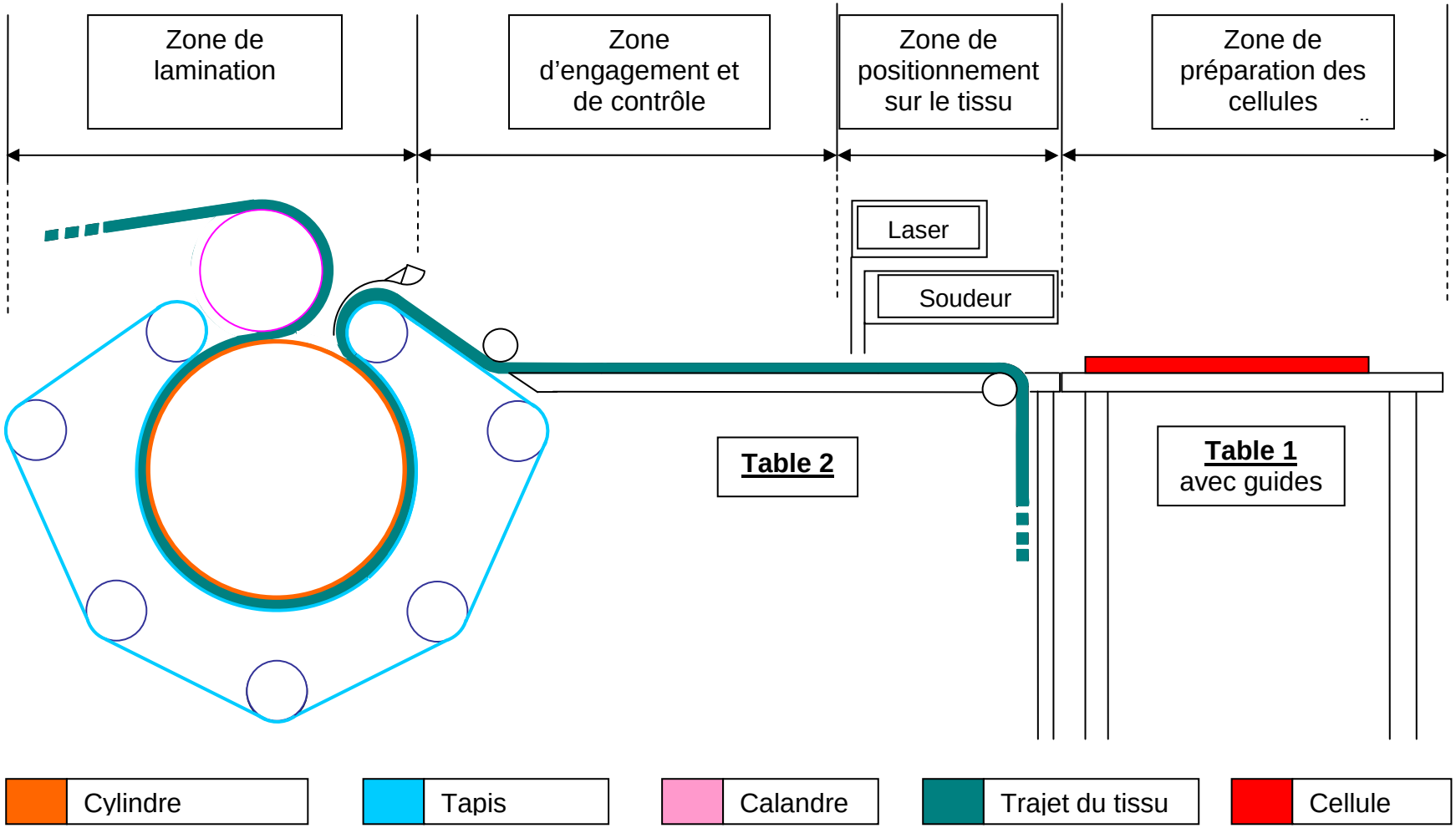


Figure 138 : *Machine d'origine de lamination Dickson-Constant et installation de table de positionnement de la cellule et de tables de fixation de la cellule*

Détails des modifications :

Bien que la méthode finale ne soit pas définie, il est tout de même possible dans un souci d'amélioration du procédé d'annoter les détails suivants :

- Corriger les longueurs et écartements des rainures de fixation des guides cellules sur table 1 (la largeur à guider doit être comprise entre 100 et 150 cm).
- Intégrer dans l'épaisseur de la table 1 des réglets (deux de chaque côté) basés sur un zéro repéré au centre de la table pour le réglage des guides.
- De la même manière et alignée sur les réglets précédents, disposer une mesure de la laize en bord de table 1, le plus proche possible de l'arrivée du tissu sur la table 2 pour permettre de centrer ce dernier.
- Souder des raidisseurs sous les deux tables.
- Souder une barre pleine en quart de cercle sur le bec d'entrée de la lamineuse pour rabattre la matière vers le tissu en cas de léger soulèvement et par la même occasion renforcer le bec dans sa longueur et éviter qu'il ne s'affaisse au centre.
- Installer un rouleau pour l'arrivée du tissu sur la table 2.

Installer des rouleaux presseurs (au moins 4 groupes de deux sur la longueur de la table) pour asservir les vitesses des deux éléments à unir avec une certaine longueur de trajet avant l'entrée dans la lamineuse afin de pouvoir observer et intervenir en cas d'un éventuel problème de positionnement, de plissement ou autre (Figure 137).

- Installer un rouleau pour l'engagement de l'ensemble tissu + cellule sur le tapis.

Il est possible de s'affranchir de rouleaux presseurs dans le cas où l'on opterait finalement pour les solutions suivantes :

- une solution adhésive (qui permette donc d'obtenir une accroche dès la zone de positionnement),
- une fixation préalable par soudure ultrason ou un quelconque autre procédé (ce qui serait préférable à mon sens).

Toutefois, la conservation de ces pièces permettrait de garder le trajet du tissu et cette zone d'observation. Ainsi, la dépose de la cellule sur le tissu en est facilitée.
Cependant, il est possible de garder un rouleau en fin de table 2 pour plaquer le tissu sur la table et positionner de façon plus précise des cellules (Figure 137).

- Toujours dans un souci de précision, la table 2 peut être équipée d'un laser traçant la laize sur le tissu. Ce laser traçant indique l'endroit exact où poser la cellule pour qu'elle soit parallèle au lé.

- Dans le cas de la solution soudure, il faudra également installer les soudeurs en début de table 2, au niveau du laser. Ceci permettrait d'immobiliser la préforme positionnée de manière précise sur le tissu lors de l'entrée dans la machine. Lors des premiers essais un adhésif remplit cette fonction.

La proportion des longueurs des zones d'engagement et de positionnement n'est pas arrêtée et l'on peut imaginer d'augmenter la taille de la zone de positionnement.

En plus de ces quelques améliorations, il reste les changements déjà mentionnés auparavant :

- Table de sortie (3m) avec rouleaux pour l'avancée du tissu avec système de découpe en début de table.
- Mesure du défilement du tissu à l'entrée.
- Changement du potentiomètre de réglage vitesse et peut-être également l'afficheur.

Remarque : La provenance du tissu n'est volontairement pas indiquée sur le schéma car plusieurs options sont possibles selon le conditionnement. En effet, on peut imaginer un petit rouleau installé en pied de table 2. Une autre solution consiste à utiliser un rouleau passant sous la table 1. Cette pièce de tissu doit être aussi volumineuse que possible en tout début de chaîne. Ceci dans le but de limiter les pertes de matière et de temps lors du renouvellement de l'approvisionnement. L'idée d'une zone de réfrigération en sortie est à mettre en suspend et son éventuelle efficacité sera à vérifier une fois les matières utilisées pour la lamination définie.

IV.1.C.f Qualification de l'acrylique

Dans le but de qualifier et d'évaluer l'impact du passage dans la machine sur l'acrylique, les essais de qualifications de l'acrylique sont nécessaires. Les valeurs de pression, de vitesse et de température nous permettent d'établir les valeurs limites pour une altération minimale du support.

Pour ce faire, deux rouleaux de 50 TT ont été utilisés.

IV.1.C.f.i Remarques préalables :

- il est nécessaire de garder une pression suffisante pour expulser la totalité de l'air présent entre les différents éléments à unir et assurer une bonne pénétration dans la fibre du tissu,
- la température doit être suffisante pour permettre une bonne pénétration dans le support,
- l'une comme l'autre ne doivent pas non plus être trop élevées pour ne pas altérer les propriétés du tissu,
- compte tenu des objectifs, le but est d'optimiser la vitesse en fonction des deux paramètres : température et pression.

IV.1.C.f.ii Observations sur le fonctionnement de la machine

- La pression entre le tapis et le rouleau est réglable mais pas quantifiable. La pression qui s'affiche sur le cadran est celle des vérins qui tendent le tapis et non celle qui existe entre le tapis et le rouleau. Il suffit de trouver le bon

réglage en faisant quelques essais ou éventuellement trouver un moyen de mesurer la pression qui nous intéresse pour faire une relation entre les deux.

La pression maximale des vérins (soit 7 bars) ne semble pas excessive et une pression inférieure donne moins de tension sur le tapis. Nous resterons donc sur cette valeur fixe pour toute la durée des tests.

- La vitesse n'est pas correctement étalonnée entre l'afficheur digital et la vitesse réelle. La vitesse minimum atteinte est de 30 cm/min car la machine affichait 0,1 m/min et s'arrêtait lorsqu'on atteignait 0.
  Il sera facilement possible de remédier au problème d'affichage mais la vitesse minimale restera de 30 cm/min.

IV.1.C.f.iii Définition des paramètres de test :

La pression est donc fixe et réglée sur 7 bars au niveau des vérins.

On teste trois températures de passage : 150℃, 170 ℃ et 180℃.

Pour chacune des températures, on fait varier la vitesse entre 0,3 m/min, 0,4 m/min et 0,6 m/min.
Si l'on retranscrit ces vitesses en temps d'exposition à la température et à la pression on obtient alors : environ 4 min pour 0,3 m/min,
3 min pour 0,4 m/min,
2 min pour 0,6 m/min.

On obtient finalement 9 échantillons plus deux échantillons de référence (neutres) notés A et B.

IV.1.C.f.iv Analyse des résultats :

Aucune variation significative des propriétés physiques n'a été constatée. La toile n'a pas été déformée comme nous l'avions observé par la méthode utilisée par PowerFilm Solar®.

Cependant, bien que cela ne transparaisse pas dans les résultats, on sent que la toile exposée à 180 ℃ a été fragilisée concernant sa perméabilité à l'eau.

La valeur retenue pour le Schmerber correspond à la traversée de nombreuses petites gouttes simultanément ou de trois goutes qui grossissent.
On observe généralement le premier cas aux alentours de 1100 mm d'eau. Or, pour les toiles exposées à 180℃, on a systématiquement une ou deux grosses gouttes qui grossissent entre 700 et 900 mm d'eau, mais pas trois ce qui n'est donc pas suffisant pour arrêter la valeur.
Le test continue donc jusqu'à la traversée simultanée de nombreuses petites gouttes qui elle n'a pas bougée et détermine la valeur à retenir.

On retiendra donc que la température de 180℃ même à faible vitesse est utilisable mais qu'il s'agit là d'une valeur limite, laquelle il faut éviter de franchir. Il est donc

préférable si possible faire la lamination à 170℃ ou moins, sans trop de pertes de qualité d'accroche et de vitesse d'exécution.

IV.1.C.f.v Conclusion concernant les paramètres matières

En se fondant sur les campagnes de tests (en ANNEXE) on peut rappeler les paramètres optimaux définis ci-dessus, soit un passage à 0,8 m/min sur le tapis tendu avec 7 bars dans les vérins, le côté cellule exposé vers le rouleau à 150 ℃ avec un tissu protecteur (orchestra max) entre les deux. L'ensemble passe ensuite dans la calandre qui ne presse l'ensemble que par son propre poids (pas de pressions dans ces vérins).

Le résultat obtenu est parfaitement intégré dans le tissu, la surépaisseur engendrée est minimale. La surface est très régulière et la couleur parfaitement homogène.
La principale faiblesse que l'on peut constater se trouve au niveau de l'adhérence (56 N) qui est néanmoins correcte voir meilleure que celle des lés laminés par Power Film mais nettement inférieure à ceux de Flexcell®.
Le second point critique qui peut être soulevé est la fragilité du complexe. En effet, des marques apparaissent très rapidement sur la surface lorsque l'on s'écarte des paramètres optimaux. Le tissu protecteur intercalé entre le complexe et le rouleau permet cependant de réduire considérablement le phénomène.
Les échantillons à sélectionner ayant un aspect satisfaisant pour effectuer les tests électriques et de vieillissement sont les suivants :

- Tissu + laminat nu ; 1 m/min ; 140 ℃ ;
- Tissu + laminat nu ; 1,2 m/min ; 140 ℃ ;
- Tissu + laminat + tissu protecteur + calandre ; 0,6 m/min ; 140 ℃ ;
- Tissu + laminat + tissu protecteur + calandre ; 0,8 m/min ; 140 ℃ ;
- Tissu + laminat + tissu protecteur + calandre ; 0,8 m/min ; 150 ℃ ;
- Tissu + laminat + tissu protecteur + calandre ; 1 m/min ; 150 ℃.

IV.1.C.g Test de lamination : cellules photovoltaïques Konarka

Pour compléter l'apprentissage de la lamination et des comportements des différentes technologies photovoltaïques, des cellules photovoltaïques organiques de marque Konarka ont été commandées.

La lamination des cellules Konarka a été faite avec un TPU séparé (Etimex).

Epaisseur de la cellule = 0,5 mm ;
Epaisseur du TPU = 0,5 mm (avant lamination) ;
Epaisseur de l'ensemble laminé sur tissu sans calandre = 1,35 mm ;
Epaisseur de l'ensemble laminé sur tissu avec calandre = 1,2 mm.

IV.1.C.g.i Observations des laminats et du processus

- **Solidité des complexes**

La surface ne s'est détériorée pour aucun des paramètres utilisés.
Le complexe semble garder une certaine courbure après le passage dans la calandre pour les hautes températures, en l'occurrence 170 et 175 °C.

- **Rigidité des cellules**

On peut remarquer que les cellules Konarka sont particulièrement rigides et imposeraient certainement un rayon de courbure plus important que PowerFilm Solar®, ce qui impliquerait donc un tube d'enroulement plus gros et par conséquent un coffre de store plus gros.

- **Correspondance des dimensions TPU / Cellule**

L'échantillon de TPU est découpé légèrement plus petit que le morceau de cellule à laminer en prévision de l'étalement de la matière.
Il s'agit là de la première difficulté notable car on obtient certaines parties de cellules qui restent libres et non collées et à l'inverse des zones où le TPU déborde et marque le tissu en bordure de laminat et salit le rouleau par la même occasion.
Il est possible de limiter le problème sur les bords latéraux en observant l'étalement obtenu et en tronquant d'autant la couche de TPU. Il faut alors le placer précisément au milieu sous la cellule.
Cela est plus délicat dans le sens longitudinal car un autre problème vient s'ajouter à ce dernier. A l'entrée dans la machine, les différentes couches se décalent les unes par rapport aux autres. Au final, le laminat dépasse du TPU sur le début dans le sens de l'entrée machine et le TPU s'étale au delà de la cellule sur la fin.

- **Déformation des cuivres**

On observe également une dilatation du cuivre des connexions qui se traduit par des ondulations

- **Utilisation de la calandre**

Elle améliore clairement les résultats à 150 °C mai s devient difficilement utilisable à 170°C car elle déforme la cellule qui reste ensuite incurvée.

Tableau 19 : *adhérence des cellules Konarka sur tissu Orchestra max avec film adhésif TPU Etimex 0,5*

délamination Konarka / TPU Etimex 0,5 / Orchestra max				
Paramètres de lamination			**Adhérence**	
température (℃)	vitesse (m/min)	Conditions de lamination	Charge moyenne (N)	charge à la crête (N)
150	0,3	calandre	19,4	31,6
		sous tissu + calandre	10	42,4
	0,6	**calandre**	**64,5**	**81,7**
	1	calandre	10,5	12,7
170	0,3	nu	37,4	86,8
		sous tissu	39,2	82,3
	1	nu	16,1	47,5
		sous tissu	13,8	36,8
		sous tissu + calandre	16,8	109,6
	1,5	nu	16,7	32,3
175	0,3	nu	45,8	78,8
		sous tissu + calandre	22,8	49,6

D'une manière générale, les valeurs ne sont pas très élevées. C'est en ralentissant au maximum le processus et en augmentant la température à la limite acceptable par le tissu que l'on finit par s'approcher des valeurs obtenues pour Power Film soit 45,8 N pour 0,3 m/min à 175 ℃ (ligne orange).

Le tissu protecteur qui pourrait éviter de tâcher le rouleau avec le TPU, diminue de manière importante l'adhérence même si l'on passe en plus par la calandre.

On observe une valeur particulière d'accroche, à 150℃ et 0,6 m/min, correspondant à un pic d'adhérence. On utilise alors la calandre mais sans le tissu protecteur.

Remarque : une cellule passée à 180 ℃ fonctionne encore après un passage nu à 0,3 m/min par contre il faudrait mettre en œuvre un test en extérieur pour estimer les pertes de rendement engendrées.

IV.1.C.h Test de lamination : préformes Flexcell® 35 x 35 cm

Les préformes en question sont deux séries de plaques laminées composées des couches suivantes (en mm) :

- ETFE (0.1) / EVA (0.3) / EVA (0.5) / ETFE (0.1) ;
- ETFE (0.1) / EVA (0.3) / EVA (0.5) / ETFE (0.1) / TPU (0.5);

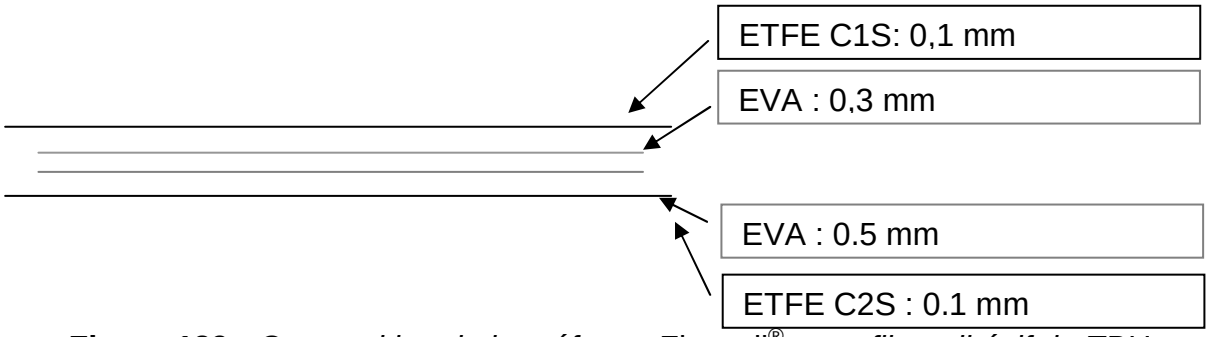


Figure 139 : *Composition de la préforme* Flexcell® *sans film adhésif de TPU*

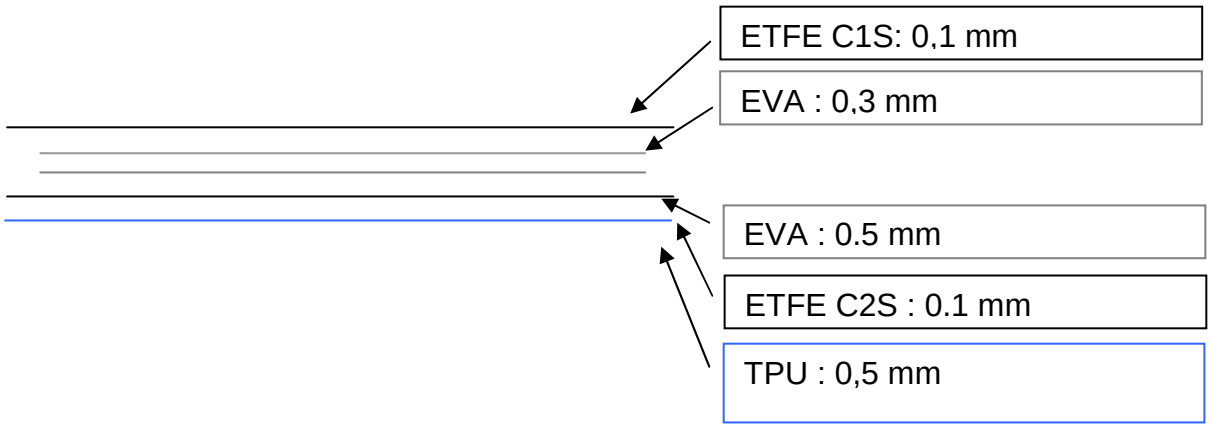


Figure 140 : *Composition de la préforme* Flexcell® *avec film adhésif de TPU*

Epaisseur avec TPU mesurée ≈ 1,6 mm.
Epaisseur laminée sur tissu : e > 2,5 mm.

La première série a été testée avec du TPU et de l'EVA de chez Etimex en lamination à trois couches sur notre machine mais sans obtenir de résultats concluants.
En effet, on constate la formation d'une multitude de petites ou de grosses bulles d'air selon les paramètres sélectionnés et la charge moyenne d'adhérence n'excède pas 35N.
Le surplus de préformes non utilisées a servi et sert encore d'échantillon test pour prospecter des entreprises extérieures afin de remplacer le TPU.

La deuxième série colaminée avec un TPU 0,5 mm est directement utilisable et donne les résultats suivants :

Tableau 20 : *adhérence des préformes* Flexcell® *laminées sur tissu Orchestra Max avec TPU Etimex d'épaisseur 0,5 mm*

délamination Flexcell®			
paramètres		**adhérence**	
température (°C)	vitesse (m/min)	charge moyenne (N)	charge à la crête (N)
140	0,3	53,1	67
150	0,3	122,1	146
160	0,3	155,8	199
	0,4	131,6	161,3
	0,6	92,2	117,2
170	0,3	191,1	468,6
	0,6	157	327,4
	0,8	103,2	132
	1	63,2	75,4
	1,2	51,2	67,4

Les résultats sont tout à fait satisfaisants au niveau de l'adhérence.

Par analogie aux observations faites sur les cellules PowerFilm Solar®, quelques tests sont faits avec un refroidissement en sortie de machine.
On ne constate ici aucune amélioration et l'on retrouve exactement les mêmes résultats que dans le tableau précédent (155,2 N pour 160 °C et 0,3 m/min ; 194,5 N pour 170 °C et 0,3 m/min …).
On peut supposer que la cellule étant beaucoup plus épaisse, un refroidissement sommaire tel qu'il a été pratiqué ne peut avoir d'impact réel. Peut-être qu'un choc thermique plus saisissant serait plus concluant mais il est difficile de le mettre en œuvre en l'état actuel des choses.

Un complément de test faisant intervenir de nouveaux paramètres est maintenant réalisé :

Tableau 21 : *Adhérence des préformes* Flexcell® *laminées sur tissu Orchestra Max avec TPU Etimex d'épaisseur 0,5 mm*

délamination Flexcell®				
paramètres			**adhérence**	
température (°C)	vitesse (m/min)	conditions de lamination	charge moyenne (N)	charge à la crête (N)
140	0,3	sous tissu	0	0
		sous tissu + calandre	0	0
		calandre	22,1	33,5
150	0,3	sous tissu	0	0
		sous tissu + calandre	0	0
		calandre	86	122,3
170	0,3	sous tissu	110,6	132,6
		sous tissu + calandre		
		calandre		
	0,6	sous tissu	4	6,3
		sous tissu + calandre	63	153,3
		calandre		
	1	sous tissu	0	0
		sous tissu + calandre	5,8	9
		calandre		
	2	sous tissu	0	0
		sous tissu + calandre	0	0
		calandre	34,5	73,9

La cellule Flexcell® étant beaucoup plus épaisse que les cellules PowerFilm Solar®, il est vraiment difficile de les faire passer dans la calandre sans les détériorer.
Le tissu de protection facilite cette opération mais diminue considérablement les résultats.

- la lamination à nue et sans calandre reste la plus appropriée pour Flexcell®, les adhérences obtenues sont particulièrement encourageantes,
- il reste néanmoins quelques sérieux problèmes, il s'agit de la rigidité qui rendrait difficilement enroulable le tissu et l'épaisseur qui restreindrait la projection du store,
- on observe également un fluage sur les cotes du complexe dû à un surplus de TPU et à la pression appliquée lors de la lamination,
- associé à cela, un léger glissement se produit entre le complexe et le tissu dans le sens de la chaîne, très certainement lié à la différence de longueur des trajets parcourus autour du cylindre chauffant. En effet, pour chaque

épaisseur le rayon d'enroulement est égal au rayon du cylindre plus l'épaisseur des couches inférieures.

Il faudrait maintenant diminuer les épaisseurs du complexe pour obtenir une épaisseur globale maximale de 1,4 / 1,5 mm contre les 2,5 mm environ que l'on a aujourd'hui et cela, avec le minimum de perte d'adhérence.

Dans cette optique, des laminations ont été réalisées avec des préformes affinées et une épaisseur de TPU de 100, 200, et 300 µm.

IV.1.C.i Lamination : Test cellule Flexcell® affinée

Suite aux problèmes de rigidité et d'épaisseur rencontrés avec les préformes 35 x 35 cm, trois nouvelles plaques avec des cellules non fonctionnelles ont été réalisées en diminuant au maximum les épaisseurs de chaque couche constituant le complexe.

Figure 141 : *Composition de la préforme* Flexcell® *avec film adhésif de TPU de marque Collano*

Il reste donc à déterminer l'épaisseur de TPU minimum permettant de conserver une adhérence convenable.
Trois épaisseurs de TPU sont donc testées 0,1 ; 0,2 et 0,3 mm
Les plaques ainsi constituées se présentent donc de la sorte :

Le TPU dont nous disposons est un film de 0,1 mm d'épaisseur de marque Collano, les différentes épaisseurs sont donc obtenues par pliage.
Après lamination, les épaisseurs obtenues sont les suivantes :

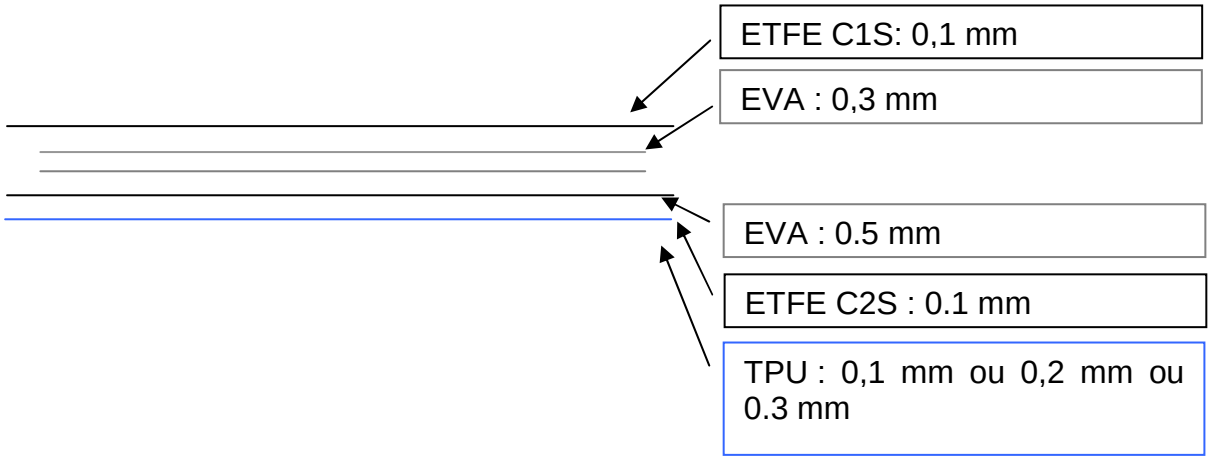


Figure 142 : *Composition de la préforme Flexcell® avec film adhésif de TPU*

TPU 0,1 : 1,6 / 1,65 mm ;
TPU 0,2 : 1,7 / 1,75 mm ;
TPU 0,3 : 1,8 / 1,85 mm.

Il est à noter que les épaisseurs sont les mêmes que ce soit avec ou sans calandre.

Malgré la diminution considérable obtenue, nous sommes encore au-delà des valeurs escomptées.
Quelles que soient l'épaisseur et la vitesse, à 140℃ les préformes n'accrochent pas au tissu.
On testera donc les températures de 150, 160 et 170 ℃.

Le passage dans la calandre est facilité grâce à la diminution de l'épaisseur mais il reste encore délicat, ce qui provoque quelques échantillons ratés et inutilisables.
Ce problème ne proscrit pas totalement l'utilisation de la calandre car les pièces laminées sont de petites tailles et il est fort probable qu'avec un rouleau de tissu défilant à la continue cette difficulté disparaisse.

Nous testerons ici les deux méthodes, avec et sans calandre.

Tableau 22 : *Adhérence des préformes Flexcell® avec TPU Collano d'épaisseurs différentes*

FORCE D'ADHERENCE Flexcell® (plaques affinées)															
		sans calandre						avec calandre							
température (°C)	vitesse (m/min)	TPU 0,1		TPU 0,2		TPU 0,3		TPU 0,1		TPU 0,2		TPU 0,3	
		moy (N)	crête (N)	moy (N)	crête (N)	moy (N)	crête (N)	moy (N)	crête (N)	moy (N)	crête (N)	moy (N)	crête (N)
150	0,3	22,6	29,8	28,5	37,7	28	38	30,6	49,2	58	72,3	60,7	74,7
	0,4	21,3	32,9	23,9	33,2	18,2	27,2	22,6	29,8	28,5	37,7	28	38
	0,6							21,3	32,9				
160	0,3	27,6	42,3	57,6	73,6	58,3	75,1	83,8	111	97,5	183	96,4	156,7
	0,4			48,6	68,4	46,2	66,4	74,8	102,1	82,4	147,5	80	117,3
	0,6												
170	0,3	86,7	109	133,5	185	152,3	192,9	105,5	152,6	115,8	232,5	124,9	207,7
	0,4	45	72,2	111,1	147	86	114,7	95,7	166,3	91,1	191,7	118	212,1
	0,6	24,2	37,4	59,3	77,7	43,7	59,8	80,6	99,5	82,7	164,3	79,8	97
	1	14,6	24,5	36	50	72,1	89,1	61,1	88	60,4	75,4	70,1	95,5

Certains échantillons ont été réalisés en passant deux fois dans la machine, mais les résultats ne s'en trouvent pas particulièrement améliorés.

Des essais avec une pression de 1 bar sur la calandre montrent que les résultats s'améliorent mais le faible taux de réussite de passage dans la calandre a limité l'étendu du test et reste inquiétant. Il ne vaut mieux pas compter sur cette possibilité tant que des essais avec des grandes superficies de cellules et le tissu en continu n'ont pas pu être mis en œuvre.
De la même manière, avec la calandre les résultats s'améliorent par rapport à sans calandre, mais cela n'est plus valable au-delà de 100 N.
La calandre ne semble donc pas spécialement utile dans cette configuration de test (à vérifier pour de grandes surfaces).

Les seuls échantillons qui dépassent les 100 N / 5 cm sont laminés à 170 °C, et à vitesse lente, 0,3 et éventuellement 0,4 m/min.
Le TPU 0,1 mm aboutit à des performances bien en deçà des deux autres qui sont eux généralement assez proches.
Dans un souci du rapport adhérence / épaisseur, on peut donc considérer que c'est le TPU 0,2 mm qui offre le meilleur rendement.

Après tous les tests effectués, nous nous sommes aperçus que le TPU « Collano » présente un grave problème de vieillissement (jaunissement aux UV, délamination à la température). Il ne pourra donc convenir pour notre utilisation. Par ailleurs, ETIMEX plus performant en la matière n'offre pas de produit dans cette gamme d'épaisseur (0,5 mm minimum)

Il s'agit donc de reprendre les tests et réglages avec de nouveaux produits :

- TPU (Bayer, Bemis…),
- adhésif (Adesia, Adhetec…),
- colle silicone….

IV.1.C.j Délamination ETFE / TPU Bemis et Bayer

Suite aux problèmes de vieillissement rencontrés avec le TPU Collano, de nouvelles matières sont testées afin d'évaluer dans un premier temps leur capacité d'accroche.

La calandre est ici systématiquement utilisée, mais la plupart du temps sans pression autre que son propre poids. Elle permet de mieux faire pénétrer le TPU dans le tissu et d'uniformiser son aspect.
Quelques tentatives avec des pressions supérieures seront tout de même effectuées.

Les quantités de matière disponibles étant très limitées, la liste des combinaisons de paramètres testées sera loin d'être exhaustive. On tachera de les choisir tout de même de telles sortes que l'on puisse estimer au mieux l'intérêt du produit.

Tableau 23 : *TPU Bemis (ETFE / Acrylique)*

TPU Bemis (ETFE / Acrylique)				
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**charge (N) moyenne**	**crête**
160	1	0	124,4	132,8
150	1	0	56,6	68,8
	0,8	0	78	100
	0,6	0	122,5	129,9
	0,3	0	107,5	134
		2	130,1	131,9
		4	107,1	128,2
140	1	0	49,9	55,9
	0,8	0	60,2	63,6
		1	59,4	69,2
		2	61	64,6
	0,6	0	121,2	125,8
	0,3	0	118,1	135,8

Tableau 24 : *TPU Bemis (ETFE / Acrylique)*

140	0,3	calandre sans pression	124,4	129	correspond à l'adhérence ETFE / TPU
			92,5	99,4	correspond à l'adhérence Tissu / TPU

Le produit semble intéressant et justifie des tests plus approfondis.

A 140 et 150 °C, pour des vitesses faibles (inférieures à 0,6 m/min), on obtient de très bonnes adhérences.
On observe un temps d'étirement de l'ETFE avant l'amorce du décollement.

Pour certains échantillons, l'adhérence se situe au-delà de la résistance à l'étirement de la bande de 5 cm de large d'ETFE (qui doit donc se situer entre 130 et 140 N). Dans ce cas, la délamination ne s'amorce pas et l'ETFE s'allonge jusqu'à la rupture.
A 160 °C, ce comportement s'observe même jusque 1 m /min.

Si l'on coupe la bande de TPU aux ciseaux, on peut ensuite observer la délamination entre le tissu et le TPU, dont la valeur moyenne se situe aux alentours de 90 N mais dans la configuration classique d'une délamination, ce n'est pas celle que l'on observe.

La calandre est utile mais la pression qu'on peut lui imposer ne semble pas influer particulièrement sur les résultats.

Tableau 25 : *TPU Bayer (ETFE / Acrylique)*

TPU Bayer (ETFE / Acrylique)					
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**charge (N) moyenne**	**crête**	
150	0,3	0	94,8	108,5	adhérence ETFE / TPU
			53,6	63,4	adhérence Tissu / TPU
		2	113,6	128,7	adhérence ETFE / TPU pas de décollement avec le tissu

On observe des comportements assez similaires de ce TPU par rapport au précédent mais à des niveaux d'adhérence nettement inférieurs.

Les derniers essais réalisés

Les préformes utilisées dans cette première partie sont constituées suivant la Figure 143.

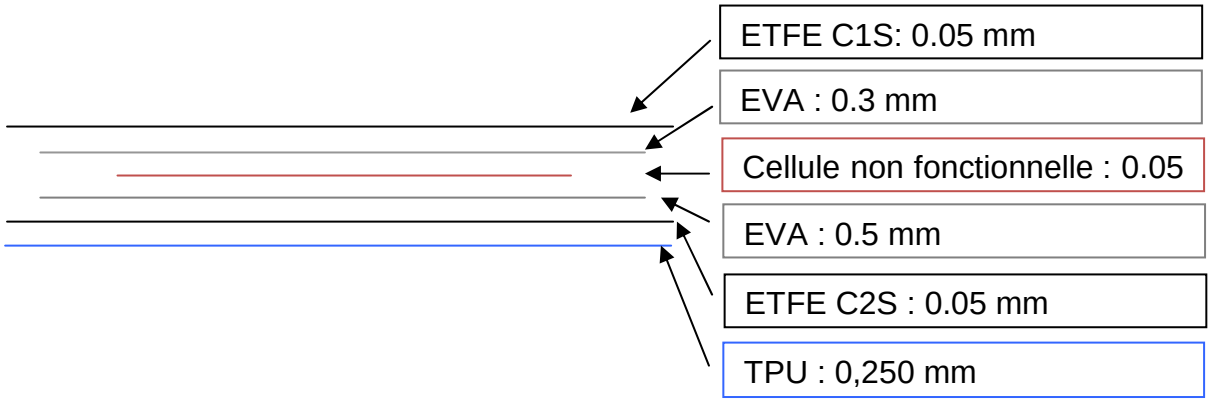


Figure 143 : *Composition de la préforme* Flexcell® *avec film adhésif TPU Bemis d'épaisseur 0,250 mm*

Remarque : De nombreux plis dus à la faible épaisseur de l'ETFE qui se rétracte sous l'effet de la chaleur ont été remarqués sur les préformes.
Ces plis sur les préformes ont une influence esthétique sur le résultat final de nos laminations. Cependant, pour ne pas devoir annuler les tests, nous les avons conservés en signalant ce défaut au fournisseur Flexcell®.



Figure 144 : *Plis de l'ETFE observés sur la préforme sans cellule*



Figure 145 : *Plis de l'ETFE observés au dos de la cellule*

Tableau 26 : *Résultats des forces d'adhérence des préformes* Flexcell® *avec film TPU intégré selon les différents paramètres de lamination*

Flexcell® (0,05 / 0,3 / 0,3 / 0,05)						**TPU Bemis intégré**
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**divers**	**charge (N)** moy	max	commentaires
170	0,3	Ø	lisse	75	87,4	homogène, pas de fluage
	0,3	0	lisse	74,2	114,7	homogène, léger fluage
	0,4	Ø	lisse	54,3	64	non homogène
	0,4	0	lisse	70,2	102,1	homogène, léger fluage
	0,6	Ø	lisse	39,7	50,4	non homogène
	0,6	0	lisse	62	79,1	homogène, pas de fluage
	1	Ø	lisse	35	41,8	non homogène
	1	0	lisse	56,5	92,5	homogène, pas de fluage
	1	0	grille	60	84,6	homogène, pas de fluage
160	0,3	Ø	lisse	61,3	72,1	homogène, pas de fluage
	0,3	0	lisse	67	89,4	homogène, fluage
	0,3	0	grille	70,3	85,1	homogène, fluage
	0,4	Ø	lisse	55,3	70,4	non homogène
	0,4	0	lisse	68,6	92,3	homogène, fluage
	0,6	Ø	lisse	41,5	56	non homogène
	0,6	0	lisse	63,1	80,9	homogène, léger fluage
	1	Ø	lisse	36,1	42,1	non homogène
	1	0	lisse	46,8	69,4	homogène, pas de fluage
	1	0	grille	59	65,6	homogène, pas de fluage
150	0,3	Ø	lisse	65,2	75	homogène, pas de fluage
	0,3	Ø	grille	54,3	71,9	homogène, pas de fluage
	0,3	0	lisse	65,1	72,4	homogène, pas de fluage
	0,3	0	grille	64,4	73,1	homogène, pas de fluage
	0,3	1	lisse	68,4	79,4	homogène, léger fluage
	0,3	2	lisse	66	86,5	homogène, léger fluage
	0,4	Ø	lisse	41,5	65,5	presque homogène
	0,4	0	lisse	56,4	64,7	homogène, pas de fluage
	0,4	0	grille	63	77,9	homogène, pas de fluage
	0,6	Ø	lisse	34,4	43,3	non homogène
	0,6	0	lisse	55,7	74,1	homogène, pas de fluage
	0,6	0	grille	51,7	75,3	homogène, pas de fluage
	1	Ø	lisse	26,4	35,3	non homogène
	1	0	lisse	46,2	57,5	homogène, pas de fluage
	1	0	grille	46,9	53,9	homogène, pas de fluage
	1	2	lisse	42,8	52	homogène, léger fluage

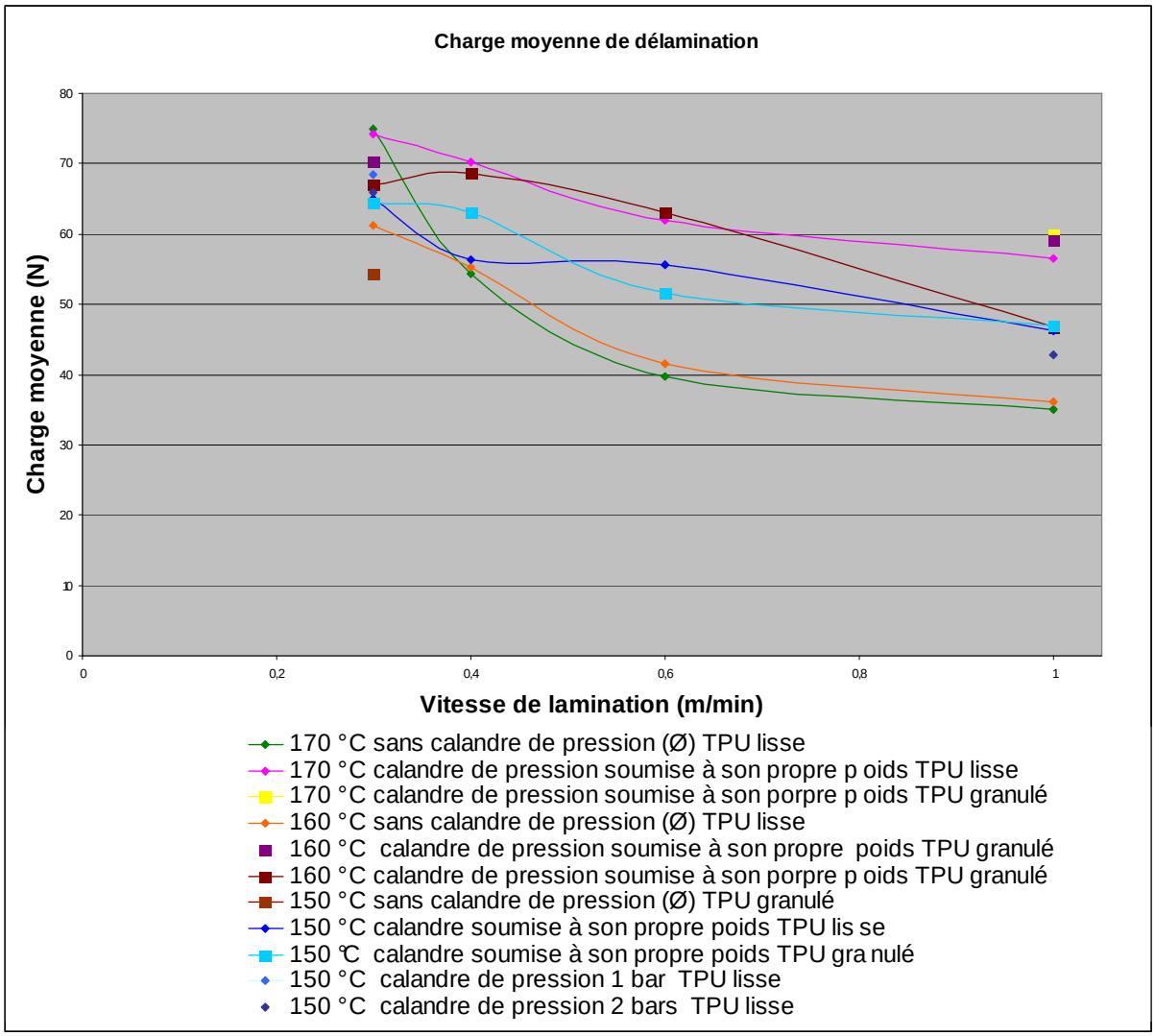


Figure 146 : *Charge moyenne d'adhérence selon les différents paramètres de lamination des valeurs du Tableau 26*

Les meilleurs résultats sont obtenus pour une température de 170 °C. Cette température risque de dégrader le tissu. Dans certains cas, la rugosité du laminat améliore la tenue.

Dans la plupart des cas, la calandre améliore l'homogénéité de la préforme laminée. Les valeurs sont plus faibles que les valeurs mesurées précédemment. Le TPU semble avoir perdu ses qualités d'adhérence lors de sa première chauffe dans la machine de Flexcell®.

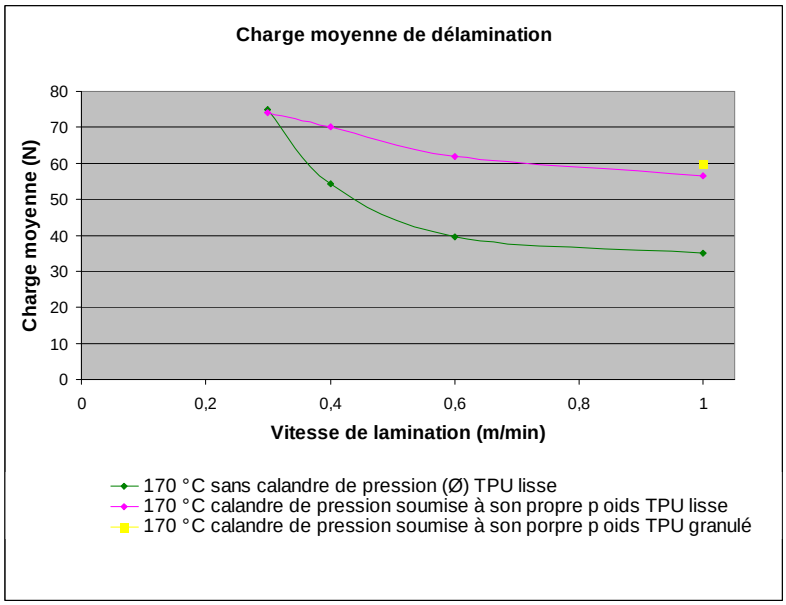


Figure 147 : *Charge moyenne d'adhérence pour une température de 170°C selon les différents paramètres de lamination des valeurs du Tableau 26*

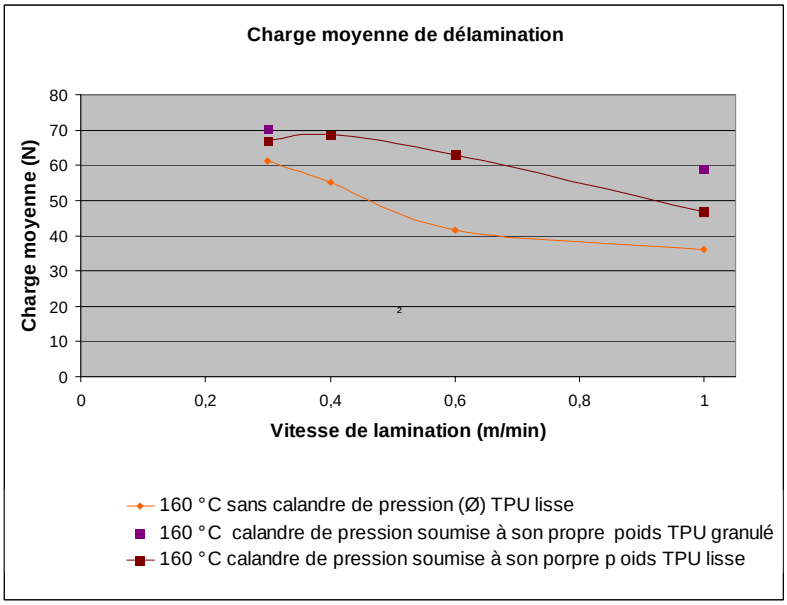


Figure 148 : *Charge moyenne d'adhérence pour une température de 160°C selon les différents paramètres de lamination des valeurs du Tableau 26*

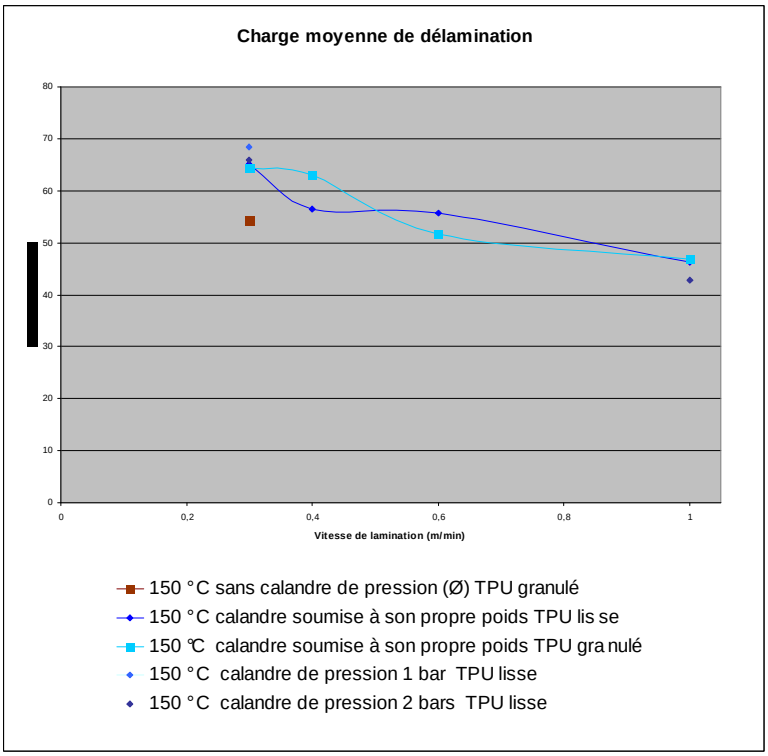


Figure 149 : *Charge moyenne d'adhérence pour une température de 150°C selon les différents paramètres de lamination des valeurs du Tableau 26*

Des essais supplémentaires ont été réalisés pour connaître l'influence de l'adhérence du TPU ajouté lors de la lamination sur les préformes. Les résultats des délaminations sont consignés dans le Tableau 27. Les préformes laminées directement sur l'EVA ont une meilleure adhérence que celles laminées sur l'ETFE.

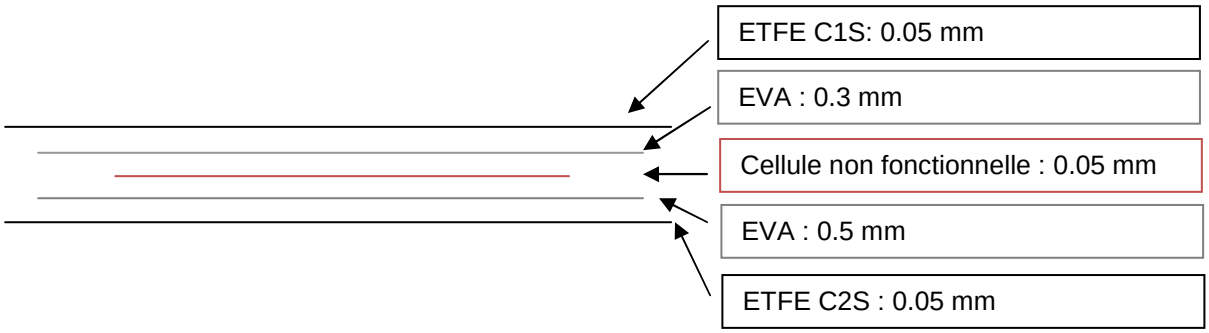


Figure 150 : *Composition de la préforme* Flexcell® *sans film adhésif TPU*

Tableau 27 : *Adhérence des laminations réalisées en ajoutant le film adhésif TPU aux préformes laminées chez Dickson*

Flexcell® (0,05 / 0,3 / 0,3 [/ 0,05]) sans TPU ; lamination en ajoutant TPU Bemis							
laminat	**température**	**vitesse**	**calandre**	**divers**	**charge** moy	**charge** max	**commentaires**
Fx ETFE	170	0,3	Ø	lisse	64,2	75,7	homogène
			Ø	grille	76,1	93,3	laminat pas net
Fx EVA	170	0,3	Ø	lisse	106,2	122	beaucoup de bulles d'air
			0	lisse	87,8	143,9	homogène
			0	grille	86,7	102,4	laminat pas net

Pour améliorer l'adhérence, un changement de trajet du tissu a été opéré. Il nous a semblé préférable de calandrer avec le cylindre presseur la préforme avant de la passer dans le tapis. Il a ainsi été possible d'appliquer une pression de 5 bars sur la préforme sans observer de problèmes de passage dans la machine.

Avec ce nouveau trajet, dans certaines conditions, le tissu plisse très légèrement sous l'effet de la température. Les plis suivent le sens de la chaîne.
Il a été notifié que les conditions sont liées à :

- la tension appliquée en entrée de la machine,
- la sortie du tissu,
- l'alignement du tissu en entrée et en sortie.

Les plis ont tendance à disparaître lorsque la laize en entrée du tissu est alignée à la laize de sortie.

De plus, lorsque le tissu n'est pas refroidit brusquement mais laissé tomber du tapis de sortie, les plis s'amoindrissent jusqu'à disparaître. Une solution alternative consiste à refroidir le tissu brusquement lorsqu'il est en tension.

Tableau 28 : *Lamination d'échantillons pour contrôle de l'adhérence du TPU sur le textile selon la méthode de passage dans la calandre puis le tapis.*

Flexcell® (0,05 / 0,3 / 0,3 / 0,05)			TPU Bemis intégré			
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**charge (N)** moy	max	Homogénéité de la préforme laminée	Aspect tissu
160	0,3	Ø	68,7	154,3	+++	-
	0,4	Ø	76,4	152,6	0	0
	0,4	1	94,6	137,6	+	0
	0,4	2	75,6	169,2	++	0
	0,5	Ø	53,6	79,2	--	++
	0,5	1	46,6	63,6	-	+
	0,6	Ø	42,7	52,7	--	0
	0,6	1	65,7	53	--	-
	1	Ø	30,9	37,5	---	++
150	0,5	Ø	46,14	59,2	-	0

Notations :

Homogénéité :

- *plus le nombre de « + » est important, plus l'homogénéité de la préforme laminée obtenue est bonne.*
- *0 signifie correcte.*
- *plus le nombre de « -» est important, plus l'homogénéité de la préforme laminée obtenue est jugée mauvaise.*

Aspect tissu **:**

- *moins le nombre de « + » est important, moins les plis sur le tissu sont jugés importants.*
- *0 signifie correct.*
- *plus le nombre de « -» est important, plus les plis sur le tissu sont jugés importants.*

En observant les échantillons réalisés, plus la vitesse augmente, meilleur est l'aspect du tissu aux bords de la préforme laminée. A l'inverse, plus la vitesse est lente, plus l'homogénéité est améliorée.

Les meilleurs résultats en charge moyenne lors de la délamination sont ceux dont la vitesse est à 0,4 m/minute et avec une pression appliquée sur la calandre de 1 Bar. Bien que cet échantillon n'ait pas une charge maximale trop élevée, celle-ci nous paraît tout de même suffisante.

Suite à ces essais, plusieurs tentatives d'amélioration de l'homogénéité de la préforme ont été réalisées, notamment en augmentant la pression de la calandre. En

effet, l'augmentation de cette pression permet au TPU de s'étaler de façon homogène.

Cette solution ne semble pas trop efficace pour des largeurs plus importantes. Une pression appliquée sur la calandre de 5 bars, une température de 160 °C et une vitesse de 0,4 m/minute a permis d'améliorer légèrement l'homogénéité de l'ensemble de la préforme sans que des plis sur le tissu n'apparaissent. Cependant, le fluage est plus important sur le bas de la cellule et chaque imperfection et usure du tapis est visible sur le résultat final. Enfin, nous avons remarqué à l'endroit où est positionné l'adhésif en papier qui maintient la préforme sur le textile (la partie qui entre en premier dans la machine), que la préforme est bien plus homogène. (Figure 151)

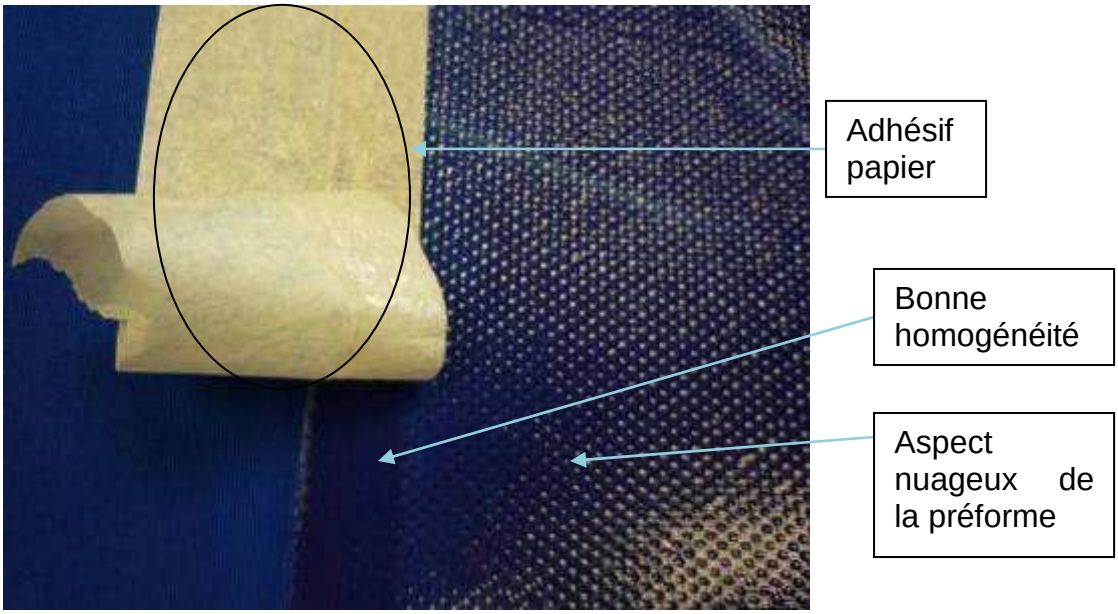


Figure 151 : *Illustration de l'homogénéité obtenue avec le papier adhésif de maintien de la préforme de lamination*

Suite à ces essais, une préforme contenant de la cellule photovoltaïque non-fonctionnelle en dimensions proches de celles requises pour la réalisation de prototypes a été laminée. Les paramètres choisis sont ceux qui étaient les plus satisfaisants pour l'essai précédent et sont les suivants :

- température 160 °C
- pression calandre : 1 bar
- vitesse 0,4 m/min

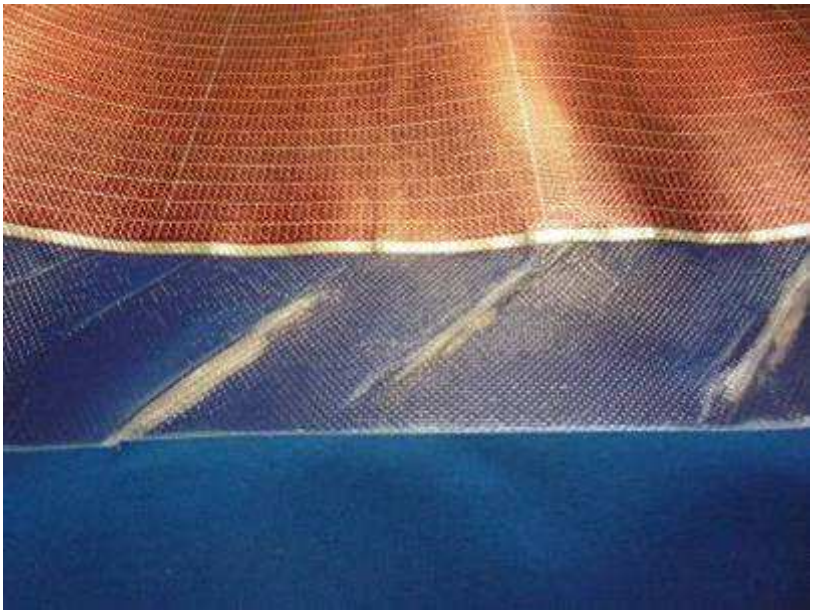


Figure 152 : *Plis observés sur la préforme laminée ne contenant pas la cellule photovoltaïque*

Il a été remarqué que les parties de préformes laminées ne contenant pas de cellules photovoltaïques ont un comportement différent : ceci s'est traduit par des plis sur cette zone. Ces plis sont semblables à ceux observés lors de la lamination avec PowerFilm Solar®. Bien que ce phénomène puisse être corrigé par ajout de matière et compensation d'épaisseur et de rigidité, il a été décidé de chercher une autre solution. (Figure 152)

Pour diminuer ces plis, nous avons tenté d'augmenter la pression de la calandre pour écraser la partie la plus épaisse et la plus rigide (celle contenant la cellule photovoltaïque) et la mettre au même niveau que l'autre partie. Pour ce faire, une pression de 4 bars a été appliquée sur la calandre. Aucune amélioration n'a été observée après cet essai.

L'augmentation de pression n'est certainement pas suffisante pour compenser cette épaisseur et éviter ce glissement qui doit être accru par la forte température. Il faudrait sans doute réaliser à nouveau cet essai soit en diminuant la température soit en augmentant la vitesse. Une augmentation de vitesse permettrait certainement de diminuer le temps d'exposition de la préforme à la température. Toutefois, ce changement de paramètre risquerait fortement de diminuer l'accroche de la cellule sur le tissu.

La solution la plus sûre est l'utilisation d'une matière adhésive pour compenser l'absence de cellules photovoltaïques dont l'épaisseur et la rigidité ne sont pas nulles.

IV.2. *Conclusion*

La méthode développée par Dickson semble être adaptée à la lamination à réaliser. Beaucoup d'améliorations et d'adaptations sont envisageables avec cette machine.

D'après l'ensemble des tests réalisés, il est préférable de laminer la cellule en passant d'abord dans la calandre pour éviter la création de plis sur le tissu. Contrairement aux cellules Flexcell® ou PowerFilm Solar® pour lesquelles on obtient des résultats encourageants, les cellules Konarka ne doivent pas être laminées avec un film thermofusible.

Pour des soucis de confidentialité et de performances d'adhérence, à terme la préforme ne doit pas contenir le film de polyuréthane thermoplastique. Il peut être ajouté lors du procédé de lamination sur le tissu en entreprise.
D'un point de vue géométrique, nous avons pensé que les coins des préformes laminées doivent être arrondis pour diminuer la prise à la délamination. La force pour délaminer un morceau de préforme laminée ponctuel est inférieure à la force de délamination d'un bord ou d'un contact linéique.

Les tests de vieillissement doivent encore être réalisés pour connaître le comportement dans le temps de la toile et de son laminat en prenant en compte les aspects mécaniques, esthétiques et électriques.

Ceci permet d'appréhender les normes IEC 61646 [26] et 61730 [27] afin de certifier les toiles photovoltaïques.
Ce chapitre a montré l'intérêt de travailler avec le complexe le plus fin possible. Les épaisseurs ont été réduites pour diminuer la rigidité de l'ensemble de la toile photovoltaïque. Cette réduction d'épaisseur peut tout de même diminuer les performances de la protection électrique des cellules et engendrer des problèmes liés à la garantie des cellules.

V.Mesures & Performances

Afin de compléter le développement du produit dont l'élaboration a été décrite dans les chapitres précédents, un protocole de tests a été élaboré. Ce protocole permet de comparer plusieurs technologies, plusieurs fournisseurs, mais aussi d'évaluer le développement imaginé et les modèles établis dans le bureau d'études.

Ainsi, plusieurs critères sont étudiés :

- Assemblage du produit ;
- Compatibilité des éléments (toile photovoltaïque, armature, câblage…) ;
- Durabilité du produit (esthétisme, performances mécaniques, performances électriques).

Bien que nous tentions de qualifier les composants du produit au cours de chacune des étapes, il est tout de même important de qualifier son fonctionnement et ses impacts sur l'environnement.

V.1. *Les différents tests mis en place*

V.1.A. Etat de l'art

De nombreux tests ont déjà été développés par différentes entreprises ou laboratoires pour tester diverses technologies, appareillages électroniques ou encore les influences météorologiques tels que les ombrages [78].

L'Institut National de l'Energie Solaire (INES) a réalisé des tests visant à mesurer les performances des systèmes photovoltaïques et modéliser le comportement de la partie « courant continu » et des onduleurs [79].
Ainsi, une installation photovoltaïque a été entièrement mise en fonctionnement à l'INES.

Cette installation a été couplée à des systèmes d'enregistrement de données « National Instrument ». Les données mesurées sont les suivantes :

- mesures de température de modules,
- mesures de tension et courant de l'onduleur (coté alternatif et continu),
- mesure puissance produite,
- mesures énergie produite.

Les mesures sont stockées dans une base de données Access et ensuite archivées dans une base de données SQL autorisant des tailles plus importantes.
Takuro Ihara et Hironori Nishihara dans la revue Studies on the outdoor performances of Amorphous Silicon Solar cells de Fuji Electric [80] relatent les travaux réalisés pour comparer les performances de panneaux photovoltaïques

composés de différentes technologies de cellules. Les technologies comparées sont les suivantes :

- tandem silicium amorphe/silicium amorphe germanium,
- tandem silicium amorphe/silicium amorphe,
- silicium cristallin,
- silicium amorphe.

Deux modules de chaque technologie sont installés.

Les tests ont été réalisés à Yokosuka dont la position GPS est la suivante : latitude Nord 35°13' et longitude Est 139°37'. Les mesures s ont effectuées à intervalles de temps de 10 secondes, puis une moyenne est calculée chaque minute. Les mesures de performances ont été réalisées avec un angle d'inclinaison de 31°.
Les données communiquées dans le rapport résultent de 3 ans d'observations. D'autres critères ont été évalués tels que l'orientation et l'inclinaison des modules tandem Si-Ge/ Si-Ge.

Dans un contexte différent, les travaux de Pascal Goulpié au sein de l'entreprise Flexcell® peuvent aussi être évoqués [64]. Ainsi, le store photovoltaïque développé a été exposé sur le bâtiment des Services Industriels de Lausanne (SIL de coordonnées GPS latitude Nord 46° 31' 24.46" et lon gitude Est 6° 37' 27.69") et mis en service en Mai 2005. Le store bénéficie d'une exposition plein Sud sans ombrage possible. Le store est composé de cellules photovoltaïques de 4.2 m² pour une surface totale de 6,84 m². Le pourcentage de recouvrement de cellules photovoltaïques avoisine 61%.

La puissance crête du système est estimée à 126 Wc. L'onduleur utilisé est un Soladin 120 de marque Mastervolt.

L'installation est couplée à un automate de marque National Instrument et permet d'enregistrer les données.

V.1.B. Les prototypes à tester

Pour mettre en place le protocole de test, des prototypes spécifiques ont été réalisés. Il a tout d'abord fallu dimensionner l'ensemble des appareils à utiliser pour effectuer les mesures.

V.1.B.a Développement des outils informatiques

Pour être précis dans l'élaboration du protocole de test et pouvoir au mieux dimensionner les appareils, il est préférable de connaître tous les paramètres à mesurer :

- les grandeurs à comparer :
  - nombre de grandeurs,
  - moyen de mesure,
  - type (analogique ou numérique),
- l'intervalle de mesure (période d'échantillonnage) ;

Pour réaliser ce système, deux pistes ont été étudiées :

- Achat d'un automate comprenant des entrées et sorties et une carte d'acquisition ;
- Développement d'un outil informatique permettant de stocker l'ensemble des mesures.

La seconde solution comporte l'avantage d'une maîtrise totale du protocole pour un coût final de l'ensemble bien inférieur à la première.
La première solution, quant à elle a l'avantage en théorie de ne pas connaître de période dite de rodage pendant laquelle il faut corriger les bogues informatiques inhérents à la compatibilité et à la complexité des divers éléments.

Pour réaliser les différents tests, deux applications ont été développées en étroite collaboration avec le service informatique de Dickson Constant.

La première permet de visualiser les performances de la cellule et n'est utilisée que pour des salons et représentations afin de mettre en valeur les prototypes exposés (car plus graphique).

La seconde est une application « client-serveur » reliée au serveur de l'entreprise Dickson Constant et permettant de stocker l'ensemble des mesures sur une base de donnée Microsoft SQL server. Le langage de programmation utilisé pour ce développement est en langage C#.
Seule la seconde application est décrite dans la suite de ce chapitre.

Celle-ci se décompose en deux parties :

- Paramétrage,
- Visualisation des données enregistrées.

Le développement de protocole de tests ne peut s'affranchir d'une bonne compatibilité entre la partie logicielle (contrôlée par un ordinateur) et la partie physique. L'interface entre ces deux parties est assurée par un automate. Cet automate comporte des entrées et des sorties de type analogiques et numériques.

Le choix de ce boîtier a été orienté par les paramètres de mesure et sa compatibilité avec le protocole.

V.1.B.b Choix du boîtier d'acquisition

Le choix de la carte ou du boîtier d'acquisition dépend essentiellement des installations à tester.

Comme nous l'avons évoqué, la carte d'acquisition doit être compatible avec les capteurs et le système d'exploitation.

Les installations

Le nombre d'installations tests dépend du nombre de prototypes et du type de test à effectuer. La dénomination de chacun des prototypes est répertoriée dans le Tableau 29.

Tableau 29 : *Libellés et numérotations des prototypes*

N°	Nombre de prototypes	Nom du prototype	Test à effectuer	Date de mise en service
1	1	prototype exposé sur le toit de l'usine	✓ Vieillissement des cellules ✓ Mesures de performances	Pas effective
2	1	store de petite taille 1	✓ Mesure de performance ✓ Vieillissement des cellules ✓ Cycle d'enroulement déroulement	Semaine 24 de l'année 2009
3	1	store de petite taille 2	✓ Mesure de performance ✓ Vieillissement des cellules ✓ Cycle d'enroulement déroulement	Pas effective
4	1	comparatif entre modules photovoltaïques cristallin et amorphe	✓ Mesure de performance Vieillissement des cellules ✓ Cycle d'enroulement déroulement	Semaine 41 de l'année 2009
5	1	store de grande taille	✓ Mesure de performance Vieillissement des cellules ✓ Cycle d'enroulement déroulement	Pas effective

Bien que son armature soit prête, le prototype numéro 5 n'a pas pu être mis en service car la toile destinée à « habiller » le store n'était pas rectangulaire. Celle-ci a donc servi pour le prototype numéro 1. Cette toile a juste était exposée en extérieur sans être reliée au réseau ni à aucune charge pour le moment. Nous avons préféré observer son comportement esthétique et attendre que le système de test ait été réglé pour les prototypes de petites tailles. Ceci afin d'éviter des dysfonctionnements et des risques d'accidents. Les câblages ont tout de même été réalisés pour une mise en fonctionnement éventuelle.

La réalisation des prototypes 3 et 5 ne pourra se faire que lorsque la maîtrise du procédé de lamination sera acquise.

Pour cette raison, seuls les prototypes déjà existants sont décrits dans la suite de ce chapitre. L'installation se résume à ce jour aux prototypes suivants :

Tableau 30 : **Libellés et numérotations des prototypes**

N°	Nombre de prototypes	Nom du prototype	Test à effectuer	Date de mise en service
1	1	prototype exposé sur le toit de l'usine	✓ Vieillissement des cellules ✓ Mesures de performances	Pas effective
2	1	store de petite taille 1	✓ Mesure de performance ✓ Vieillissement des cellules ✓ Cycle d'enroulement déroulement	Semaine 24 de l'année 2009
3	1	comparatif entre modules photovoltaïques cristallin et amorphe	✓ Mesure de performance Vieillissement des cellules ✓ Cycle d'enroulement déroulement	Semaine 41 de l'année 2009

V.1.B.c Les grandeurs à mesurer

Le Tableau 31 récapitule les différentes grandeurs à mesurer dans le cadre du protocole de test.

Tableau 31 : *Nombre d'entrées pour chacun des prototypes*

Prototypes	Grandeurs	Nombre d'entrées
1	Entrées	
	Tension PV (DC)	1
	Intensité PV (DC)	1
	Tension PV (AC)	1
	Intensité PV(AC)	1
	Puissance Lumineuse	1
	Température	1
	Total nombre d'entrées	6
	Sorties	
	Total nombre de sorties	0
2	Entrées	
	Tension PV (DC)	1
	Intensité PV(DC)	1
	Tension PV (AC)	1
	Intensité PV (AC)	1
	Puissance Lumineuse	1
	Température	1
	Total nombre d'entrées	6
	Sorties	
	Commande du store	1
	Total nombre de sorties	1
3	Entrées	
	Tension PV(DC)	1
	Intensité PV (DC)	1
	Tension PV(AC)	1
	Intensité PV (AC)	1
	Puissance Lumineuse	1
	Température	1
	Total nombre d'entrées	6
	Sorties	
	Total nombre de sorties	0

Bien que les installations ne puissent pas être pour le moment couplées au réseau à cause des accords avec le distributeur d'énergie, des délais accordés et du réseau électrique (type industriel), à terme, ce test doit être pris en compte lors de l'élaboration du protocole.

Le Tableau 31 montre qu'il y a au maximum 7 entrées analogiques. Il faut donc soit que le boîtier ait 7 entrées analogiques, soit que le logiciel accepte une association de plusieurs boîtiers.

L'automate Labjack U12 comportant une prise USB et pouvant être relié à l'ordinateur a donc été choisi. Celui-ci comporte 8 entrées analogiques, 4 sorties numériques et 4 sorties analogiques.

Ainsi, pour chacune des grandeurs décrites, il faut que le capteur réponde aux critères énoncés dans le Tableau 32.

Tableau 32 : *Grandeurs à mesurer lors des tests toile photovoltaïque.*

Grandeurs	Moyens de mesure	Plage Valeurs	Entrée/Sortie	Plage de Valeurs Entrée/Sortie Boîtier
Tension (V) DC	Pont diviseur de Tension directement couplé à la toile	Dépend du type de cellule et du choix de branchement série/parallèle. Chaque pont diviseur doit-être adapté au prototype.	Entrée	0-10 V
Intensité (A) DC	Capteur courant	Dépend du courant généré par l'ensemble de l'installation	Entrée	0-10 V
Tension (V) AC	Pont diviseur de Tension lié à la charge	0 ou 235 V	Entrée	0-10V
Intensité (A) AC	Shunt	Dépend de l'installation photovoltaïque et du taux de conversion	Entrée	0-10V
Puissance Lumineuse (W/m²)	Pyranomètre	0-1000 W/m²	Entrée	0-10 V
Température (°C)	Sonde Température	-10-35°C	Entrée	0-10 V
Commande d'ouverture et fermeture du store	Télécommande Somfy	0-3V	Sortie	0-5V

Les capteurs communs aux différents prototypes :

Température (°C) :

Sonde de température placée à côté des installations. Elle permet de connaître la température extérieure des installations.

Deux sondes sont utilisées. L'une d'elle est proche du store de petite dimension tandis que l'autre est proche du comparatif et du dôme sur le toit de l'entreprise dont la proximité géographique nous permet l'utilisation d'un unique appareillage.

Matériel :

- Sonde de température Labjack EI-1034 ;
- Câble d'alimentation (0 ; 5V) : 2 x 0,5 mm² (environ 10 m) ;
- Transformateur 230 V AC / 5 V DC ;
- Câble carte (0 à 10 V) : 0,5 mm² (environ 10 m).

Remarque : le calcul de la température est le suivant :

T [℃]. = 55,56 Vst + 255,37 – 273,15 soit T = 55,5 6 .Vst – 17,78

Ou Vst : tension mesurée aux bornes de la sonde de température.

Ensoleillement (W/m²) :

Pyranomètres placés à côté des installations. Il est orienté à 0°.
Tout comme pour les sondes de température, deux pyranomètres sont utilisés. L'un est proche du store de petite dimension tandis que l'autre est proche du comparatif et du dôme sur le toit de l'entreprise dont la proximité géographique nous permet l'utilisation d'un unique appareillage.

Matériel :

- Pyranomètre 6450 Vantage Pro2 ;
- Câble d'alimentation (0 ; 3 V) : 2 x 1,5 mm² (environ 10 m) ;
- Transformateur 230 V AC / 3 V DC ;
- Câble carte (0 à 3 V) : 1,5 mm² (environ 10 m) .

Remarque : le facteur de conversion est Ke = 1/0,00167 soit E = Ke.Vse = 598,8.Vse

V.1.B.d Description des prototypes

Le store

Le store est composé d'une toile comportant des cellules photovoltaïques de marque PowerFilm Solar®.
Celles-ci ont été laminées par PowerFilm Solar® avec la méthode sous vide. L'armature utilisée est une armature Matest de modèle Bayonne. (Figure 153)

Un châssis à roulette a été spécialement réalisé par l'équipe de maintenance de Dickson Constant pour supporter l'armature du store et prévoir ainsi un déplacement dans le cadre des tests.



Figure 153 : *Store photovoltaïque de petite dimension*

Tableau 33 : *Grandeurs à mesurer lors des tests toile photovoltaïque.*

Grandeurs	Moyens de mesure	Plage Valeurs	Plage Valeurs Entrée Sortie Boîtier
Tension (V) PV	Pont diviseur de Tension directement couplé à la toile	en parallèle : 0-65 V (DC) Sinon, il faut étudier (dépendra de l'orientation et des caractéristiques de l'onduleur)	0-10 V
Intensité (A) PV	Capteur de courant	Dépend des prototypes	0-10 V
Tension (V) Compteur	Pont diviseur de Tension lié à la charge	Dépend de la tension de fonctionnement de la charge (DC)	0-10V
Intensité (A) Compteur	Capteur de courant	Dépend de la charge (A)	0-10V
Puissance Lumineuse (W/m^2)	Pyranomètre	0-1000 W/m^2	0-10 V
Température (℃)	Sonde Température	-10-35℃	0-10 V
Commande d'ouverture-Fermeture	Relai		0-5V

Tableau 34 : *Caractéristiques prototypes*

Item	Description
Dimension totale (m²)	2
Dimension panneau (m²)	3,12
Nombre de lés	2
Dimension panneau totale (m²)	2,23
Angle d'inclinaison	26°
Orientation	Sud
Coordonnées GPS de l'emplacement	Latitude Nord : 50.65
	Longitude Est : 3.12
Azimut	Sud
Intervalle de mesure	1 minute
Charge	Résistances de 47 Ω

La charge fixe a l'inconvénient « d'écraser » les performances des cellules. Nous aurions pu utiliser une charge variable électronique ou des batteries. Cependant, la charge électronique comporte l'inconvénient d'ajouter un paramètre supplémentaire lié au vieillissement du store. Quant aux batteries, leur évolution dans le temps ajoute aussi de l'incertitude. Il faut par ailleurs veiller au niveau de charge pour ne pas fausser le test. Enfin, il faut prévoir un bac de rétention et un endroit ventilé pour les conserver.

Mesure de la tension continue (V) :

Pont diviseur de tension placé à proximité de la carte d'acquisition sur la liaison toile photovoltaïque – charge après le capteur de courant.

Matériel :

- Trois résistances $R1_a + R1_b = 6200 + 300 = 6{,}5\ k\Omega$ et $R2 = 1{,}5\ k\Omega$ théorique et en réalité on a $R1_a + R1_b = 8{,}44\ k\Omega$ et $R2 = 1{,}48\ k\Omega$;
- Câble carte (0 à 10V) : 0,5 mm² (< 1 m).

Remarque : le facteur de conversion pour obtenir la tension à partir de la tension mesurée par la carte d'acquisition est $\frac{R1_a + R1_b + R2}{R2}$ soit $Kv = 6{,}7$ et $V = 6{,}7 \cdot V_{SU}$.

Mesure de l'intensité continue (A) :

Capteur de courant LEM utilisant l'effet Hall placé à proximité de la carte d'acquisition sur la liaison toile photovoltaïque – charge, avant le pont diviseur de tension. Alimenté en 5V et disposé sur un circuit imprimé traversé par le courant provenant de la toile photovoltaïque.

Matériel :

- Capteur de courant LEM LTS 25-NP ;
- Câble d'alimentation (5 V ; 0) : 2 x 0,5 mm² (< 1 m) ;
- Transformateur 230 V AC _ +5V DC ;
- Câble carte (0,5 à 4,5 V) : 0,5 mm² (< 1 m).

Remarque : échelle de 0,625 V pour 8 A soit 0,1 V pour 1,28 A, en partant de Vsi = 2,5 V pour Ip = 0A.

A partir de la tension mesurée, on obtient l'intensité en posant :

$I_{PV} = \frac{(V_{SI} - 2{,}5) \cdot 8}{0{,}625}$ soit $I_{PV} = 12{,}8 \cdot V_{SI} - 32$.

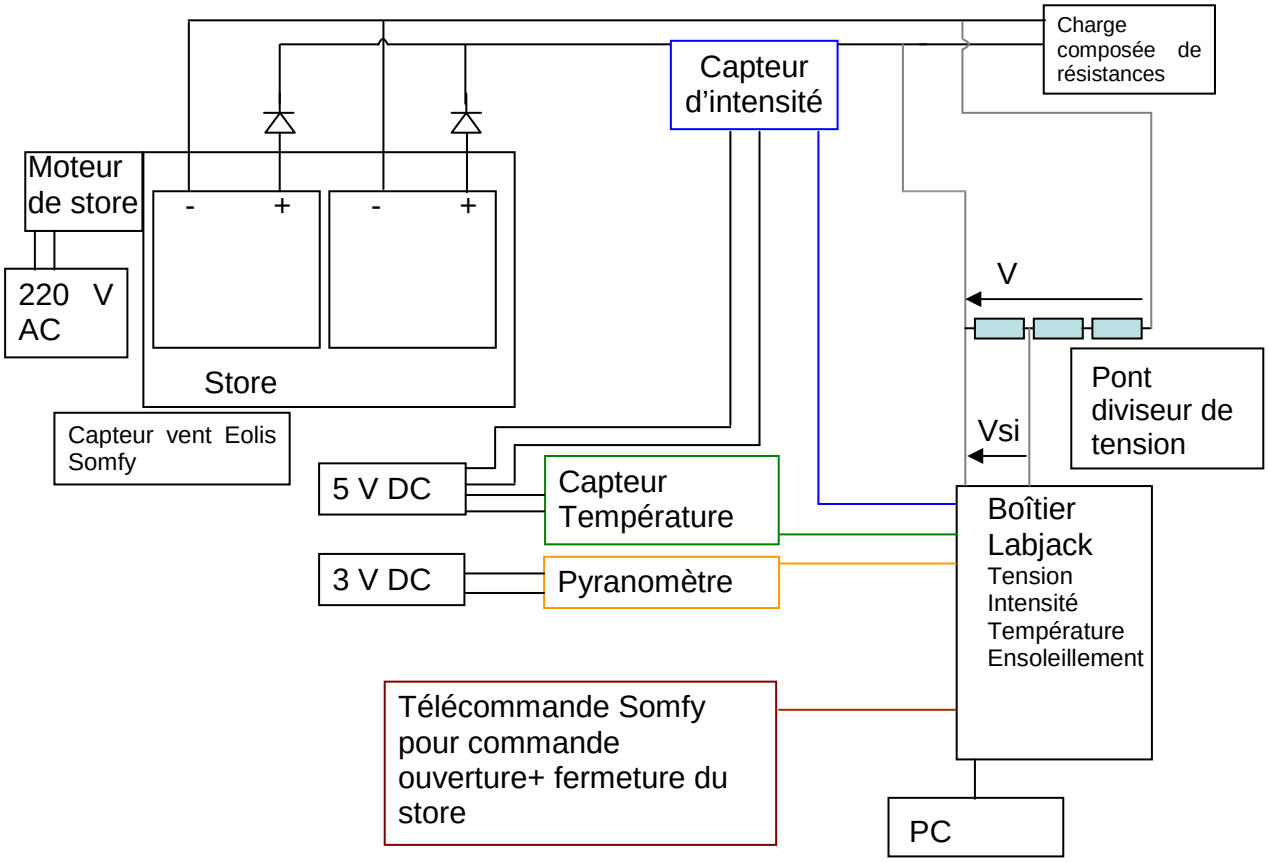


Figure 154 : *Schéma de principe du câblage du store photovoltaïque*

Antenne Wifi :

Le bâtiment dans lequel se trouve l'ordinateur de contrôle ne dispose pas d'une liaison internet. Pour pouvoir être relié au serveur, la liaison Wi Fi a été utilisée.
Un câble et une antenne dans un boîtier fixé à été disposé sur la façade extérieure du local de ce bâtiment vers l'usine. La distance du point de Wi Fi situé dans l'usine à l'antenne de notre PC est assez importante. Ceci reste un point faible à l'installation à cause de la perte du signal. Le programme a dû être modifié pour perdre un minimum de données. Un fichier de sauvegarde permet de stocker des données sur le disque dur en cas de perte de signal Wi Fi.

Câblage de la commande d'ouverture fermeture du store

L'ouverture et la fermeture sont réalisées par une télécommande Somfy couplée au moteur 4RTS par liaison radio.
Dans un premier temps, une unique télécommande pilotait l'ouverture et la fermeture du store. Celle-ci était reliée à la sortie analogique dont l'état normal était de 0 V. Une impulsion de 3,5 V pendant 500 ms sur la sortie 1 permettait de rentrer entièrement la toile de store. Et inversement une mise à 3,5 V un bref instant de la sortie 0 entraîne la sortie totale de la toile de store. (Figure 155)

Suite à un dysfonctionnement de ce procédé, il a été décidé de gérer l'ouverture et la fermeture avec deux télécommandes identiques, une pour l'ouverture et l'autre pour la fermeture. (Figure 156)

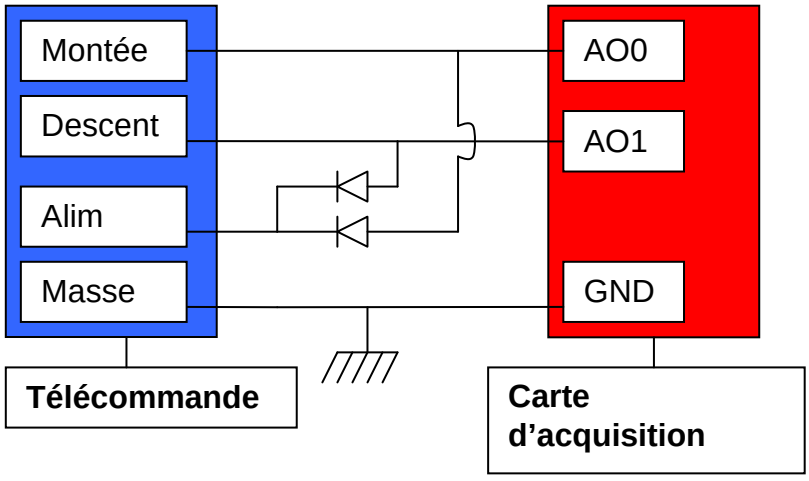


Figure 155 : *Schéma de principe du câblage de la commande d'ouverture fermeture du store*

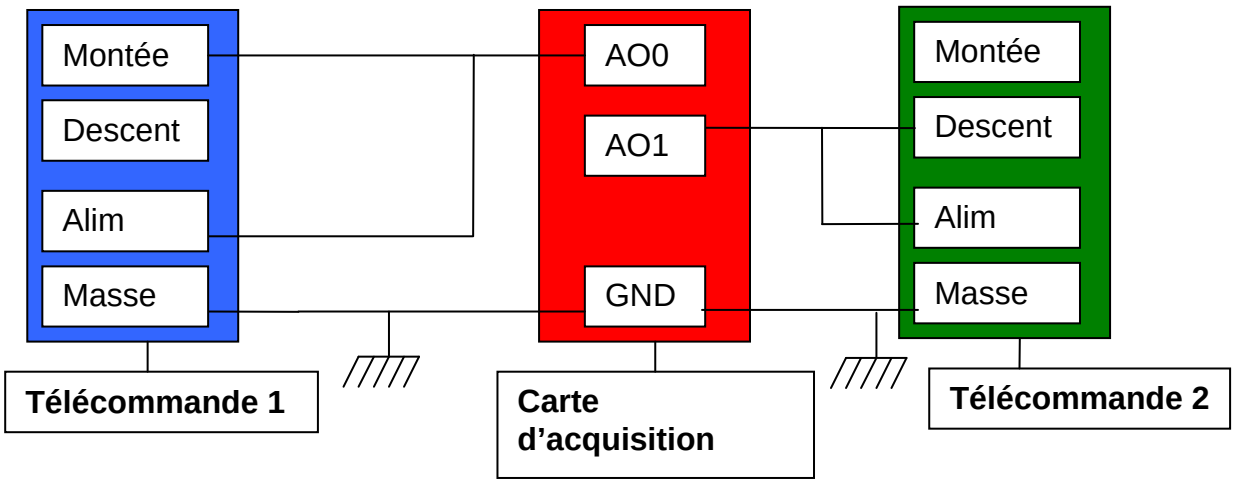


Figure 156 : *Schéma de principe du câblage de la commande d'ouverture fermeture du store sans diode*

Résultats

Chaque semaine, les données de production du store sont analysées. Une macro Excel permettant d'effectuer le tri et d'analyser les données a été développée à cet effet.

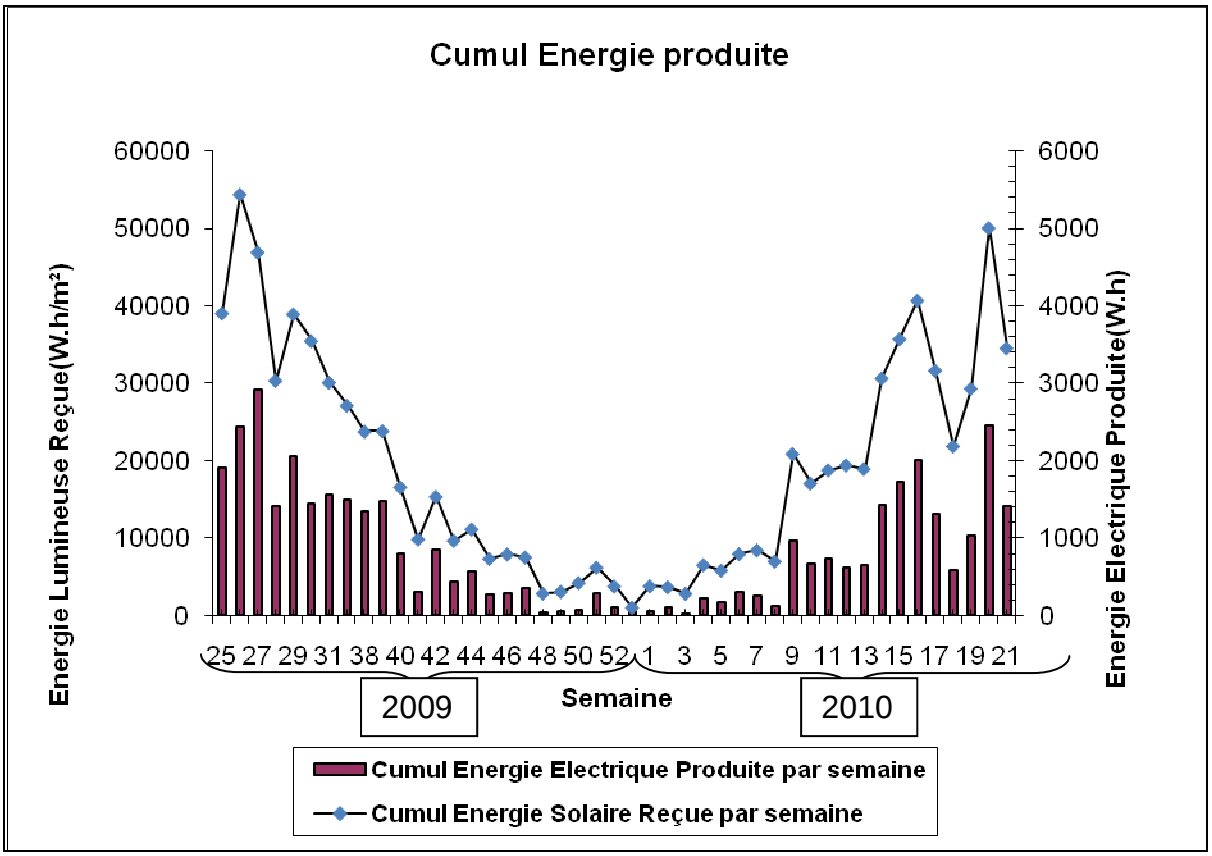


Figure 157 : Cumul de production du store photovoltaïque

Remarques : L'année 2009 comportait 53 semaines. La dernière semaine de cette année est composée des 4 premiers jours de la semaine.

Dans nos données, quelques mesures n'ont pas pu être prises. C'est le cas pour les Semaines 31 à 38 au cours desquelles une coupure du réseau Wi Fi ne nous a pas permis d'effectuer les relevés. Suite à ce défaut, un système de sauvegarde sur disque dur a été élaboré au cas où cela se reproduirait.

Malgré la mise en place de ce système de secours, la fréquence élevée des mesures remplit rapidement la mémoire du système. Une fois la mémoire saturée, les mesures ne peuvent être sauvegardées dans le serveur et l'enregistrement est repris qu'après redémarrage du système.

Le rendement brut correspond au cumul d'énergie produite par le store photovoltaïque au cours du temps, quel que soit son statut (ouvert ou fermé). C'est-à-dire :

$$\text{Rendement brut}(\%) = 100 \cdot \frac{\text{Surface du store } (m^2) \cdot \text{Energie Produite } (W.h)}{\text{Energie lumineuse totale reçue } (W.h)}$$

Le rendement net correspond quant à lui au cumul d'énergie produite divisé par la quantité d'énergie lumineuse reçue uniquement lorsque le store est ouvert. Il est important de souligner que la télécommande 1 n'actionne l'ouverture du store que lorsque la puissance lumineuse (radiation solaire) est supérieure à 100 W/m². Le store se ferme automatiquement en dessous de cette valeur. En cas de vent fort (réglage manuel) le store se ferme automatiquement aussi.

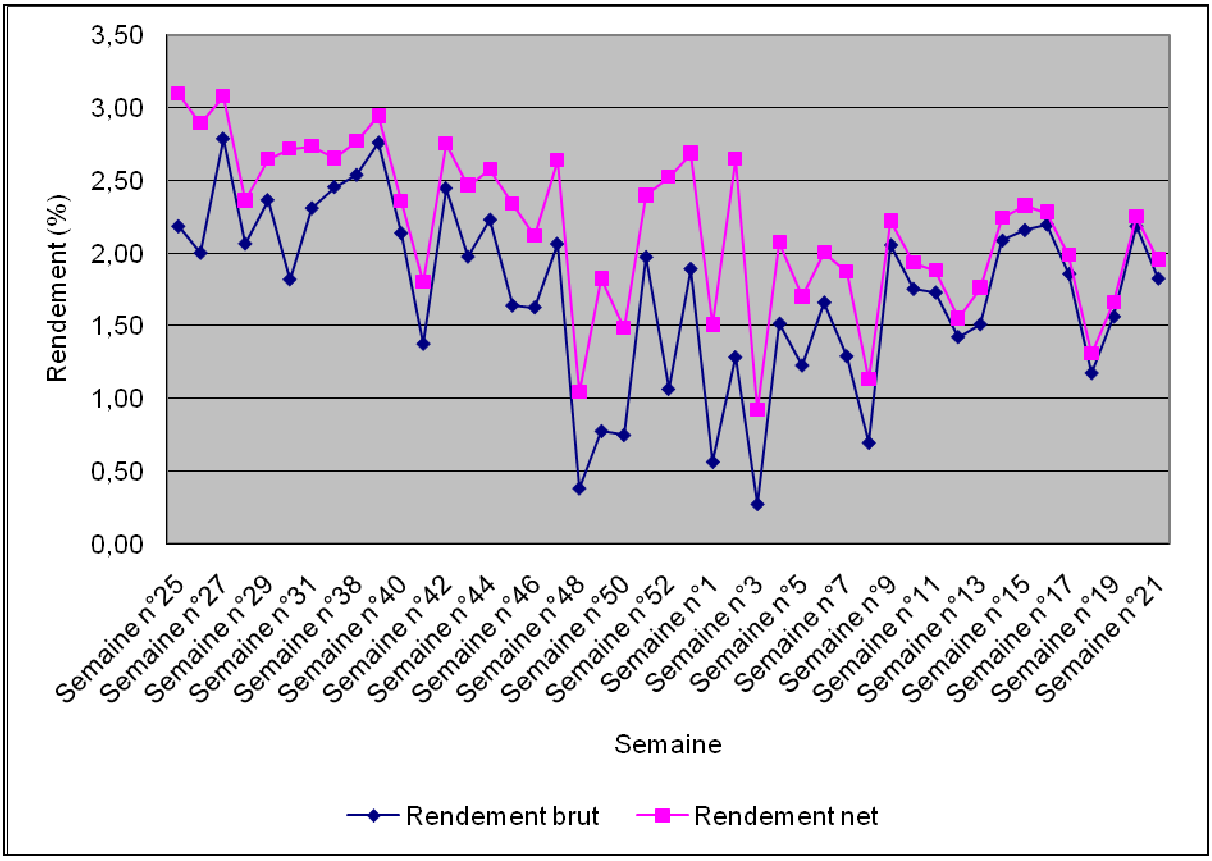


Figure 158 : *Comparaison entre le rendement brut et le rendement net du store photovoltaïque*

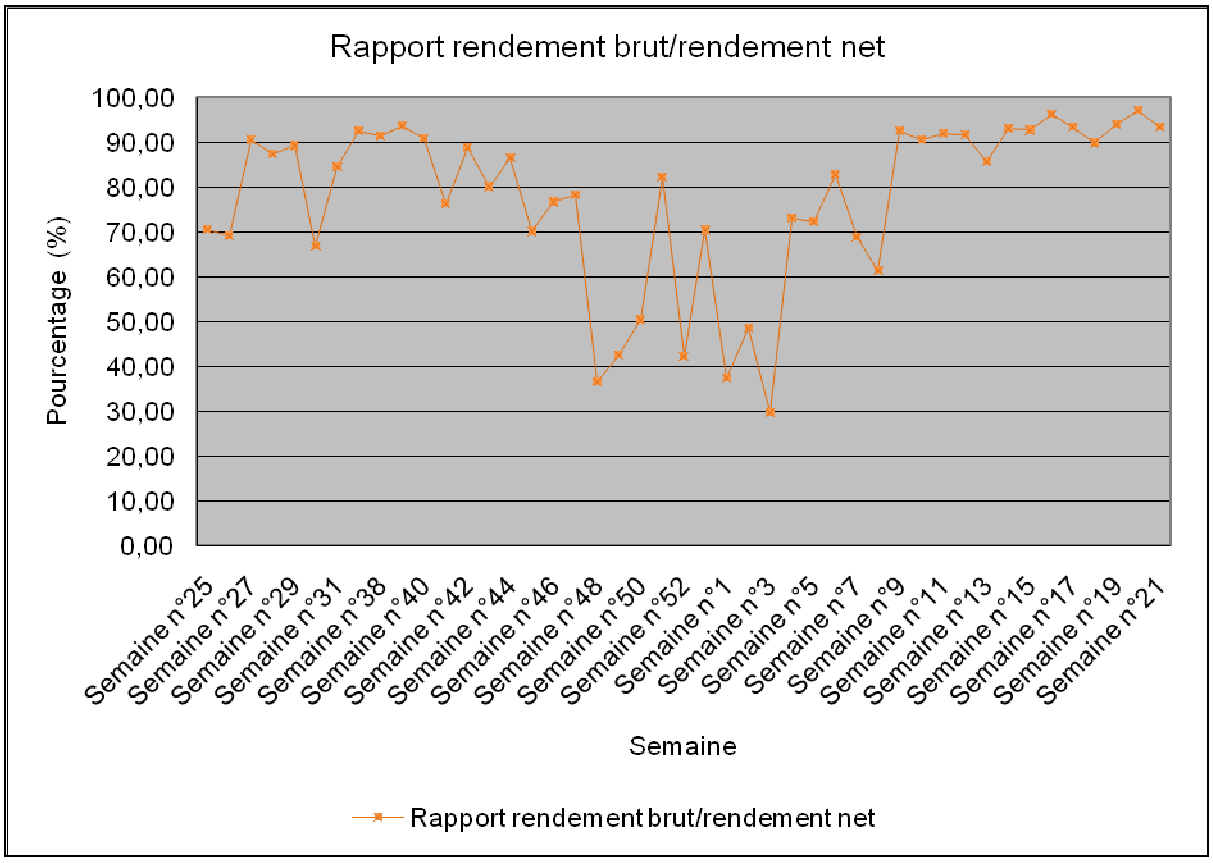


Figure 159 : *Taux entre le rendement brut et le rendement net*

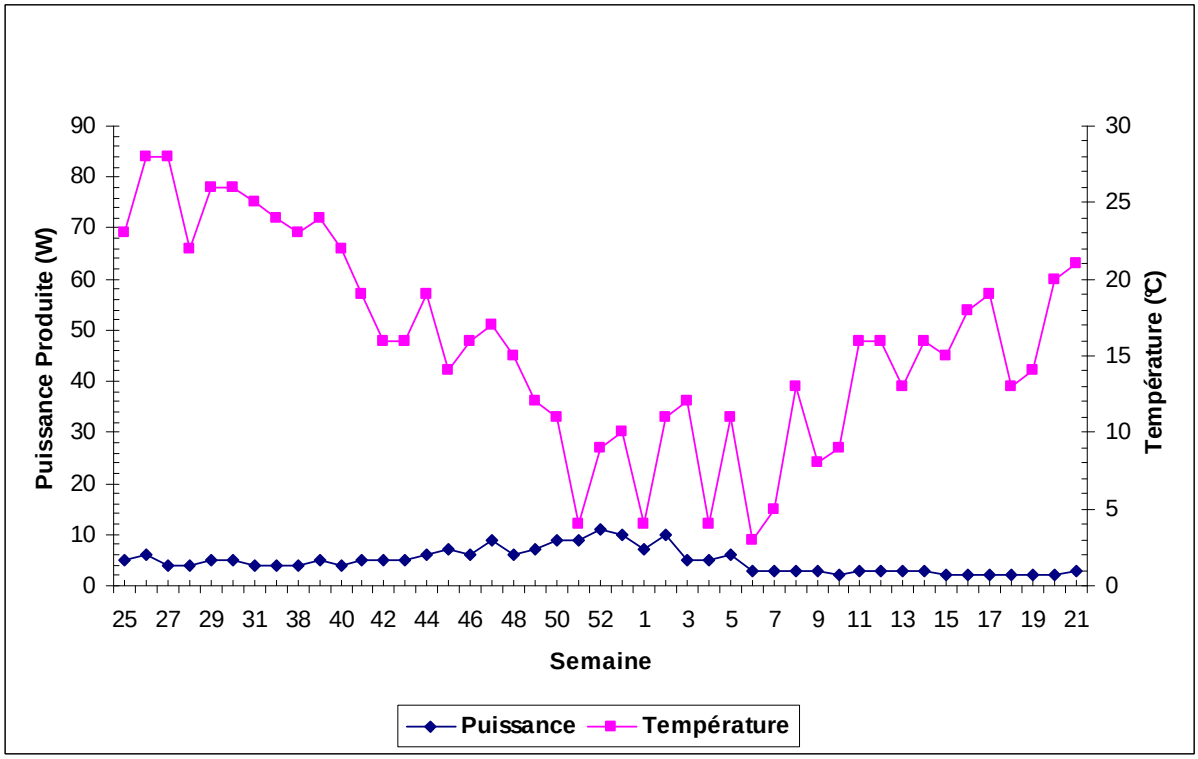


Figure 160 : *Puissance électrique produite pour 90 à 110 W/m² de radiation solaire*

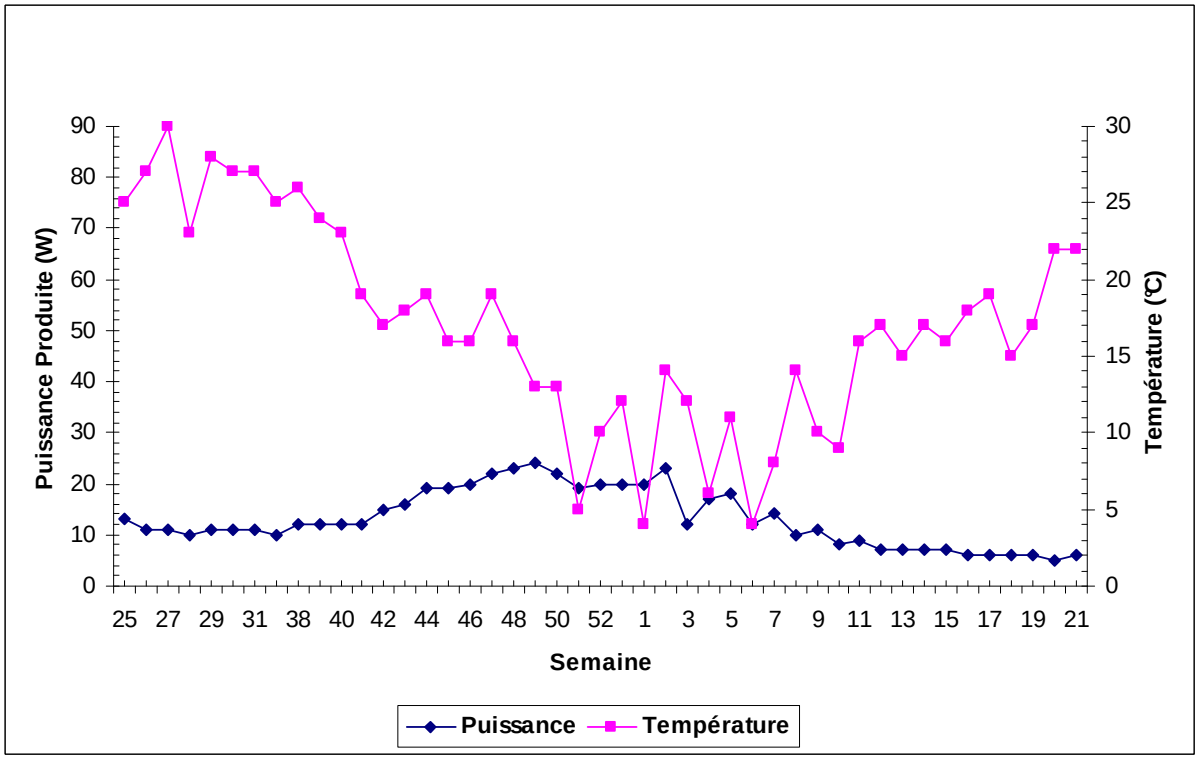


Figure 161 : *Puissance électrique produite pour 190 à 210 W/m² de radiation solaire*

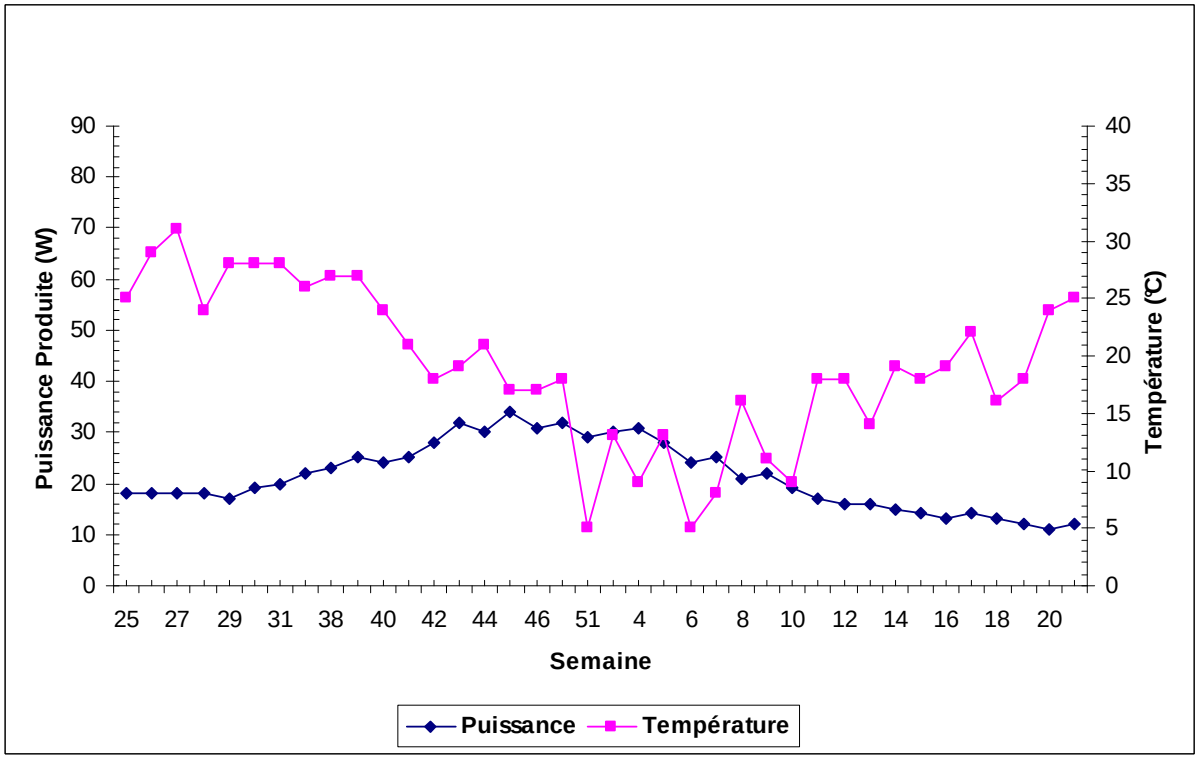


Figure 162 : *Puissance électrique produite pour 290 à 310 W/m² de radiation solaire*

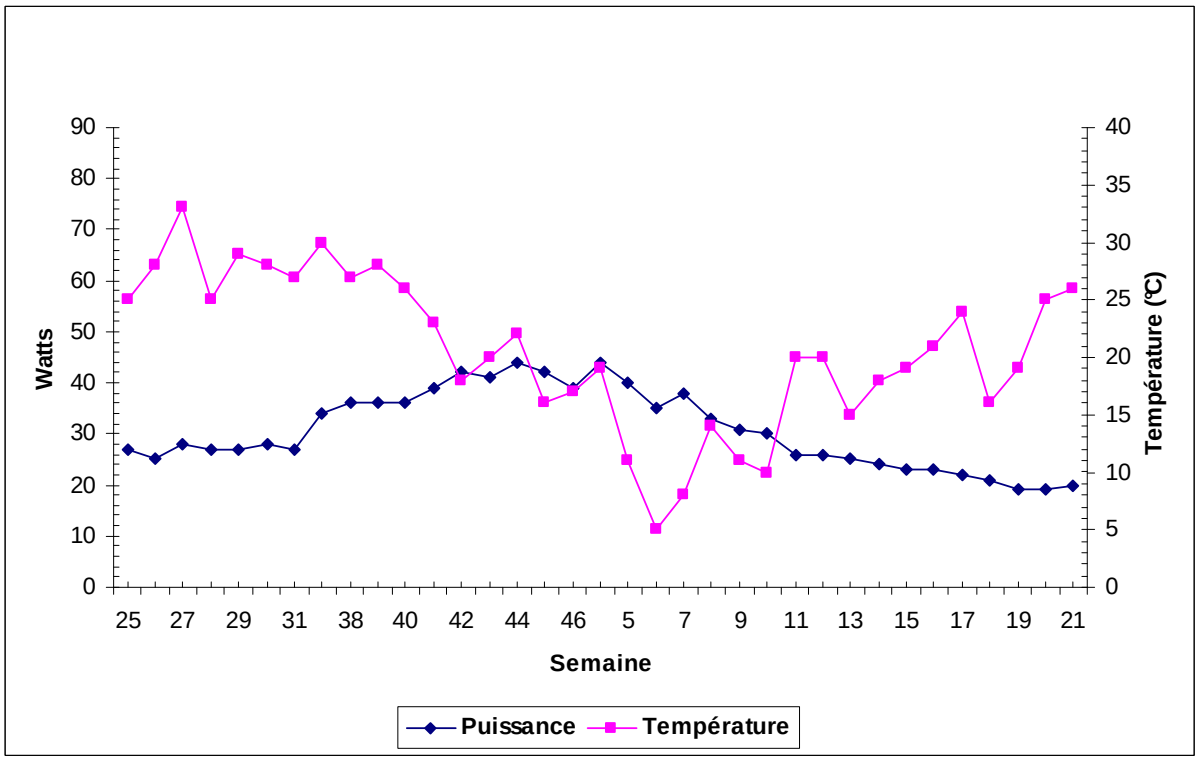


Figure 163 : *Puissance électrique produite pour 390 à 410 W/m² de radiation solaire*

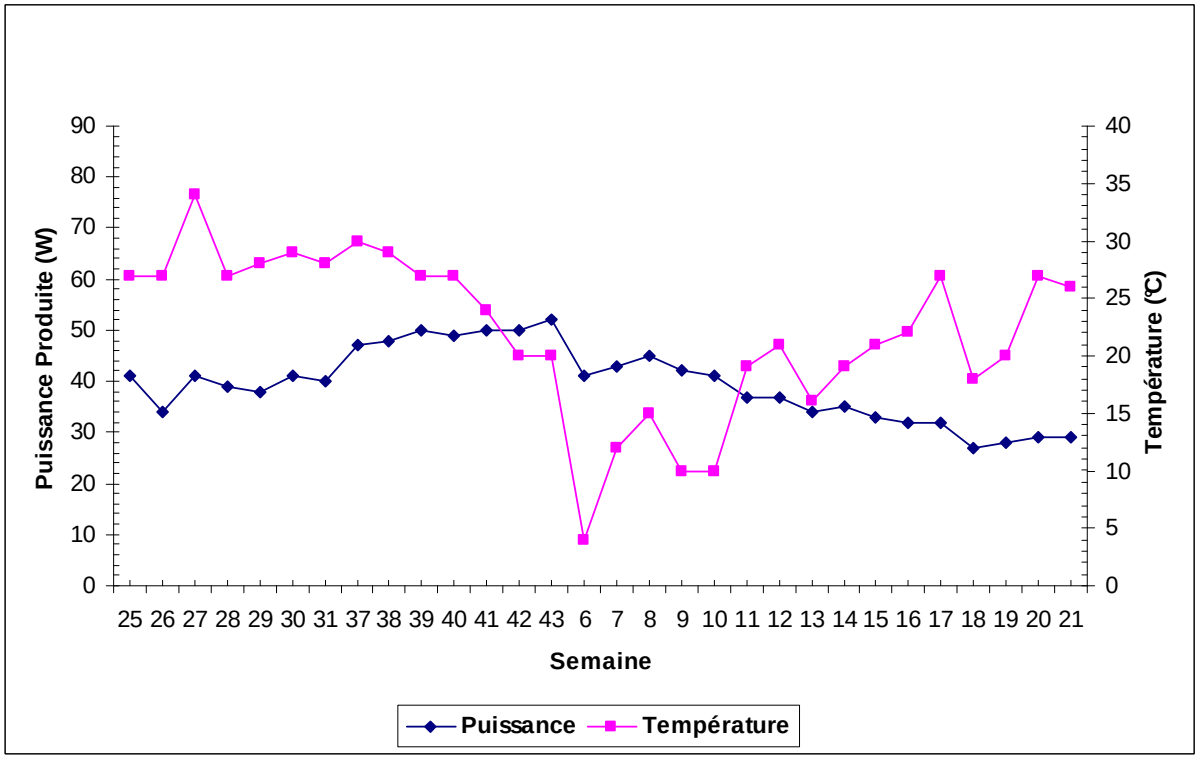


Figure 164 : *Puissance électrique produite pour 490 à 510 W/m² de radiation solaire*

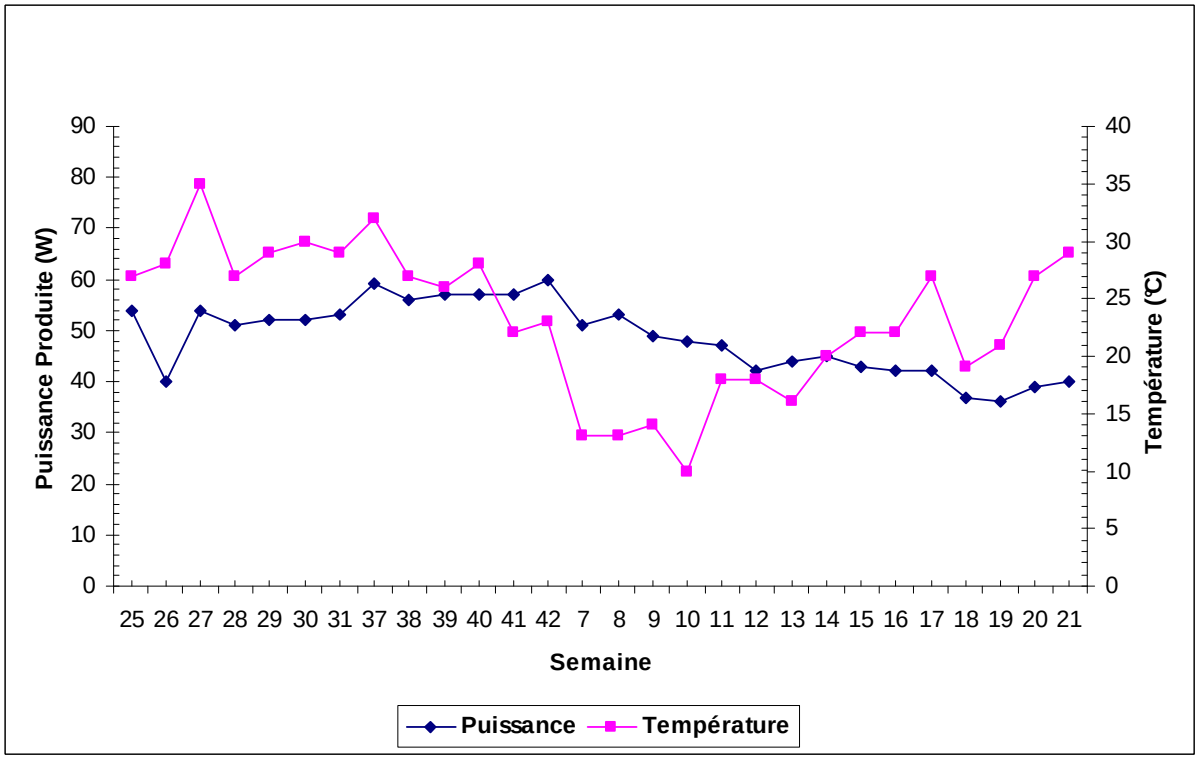


Figure 165 : *Puissance électrique produite pour 590 à 610 W/m² de radiation solaire*

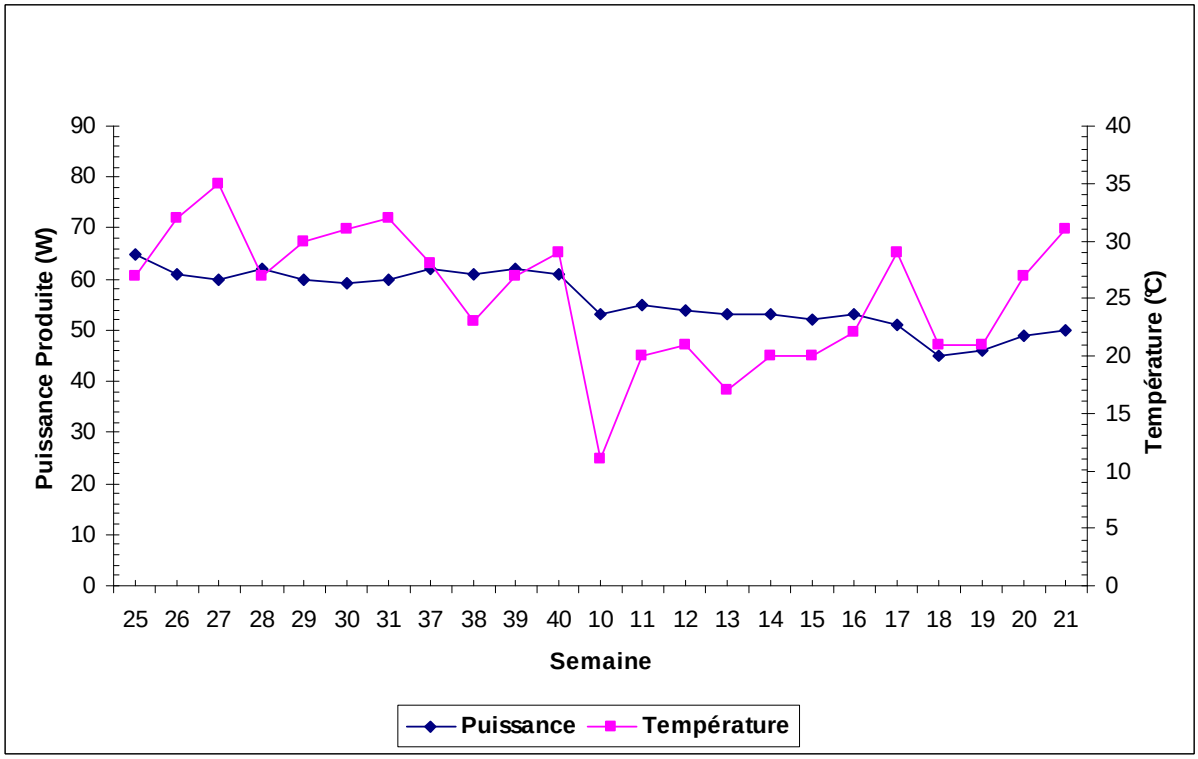


Figure 166 : *Puissance électrique produite pour 690 à 710 W/m² de radiation solaire*

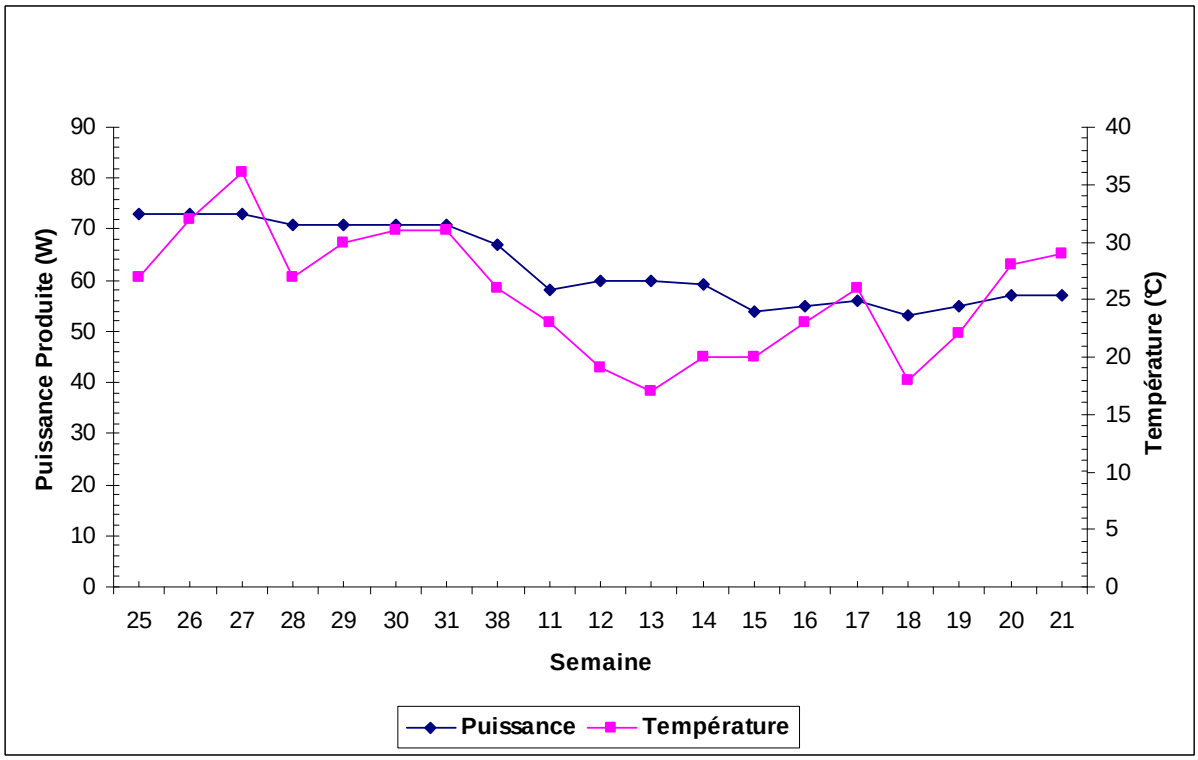


Figure 167 : *Puissance électrique produite pour 790 à 810 W/m² de radiation solaire*

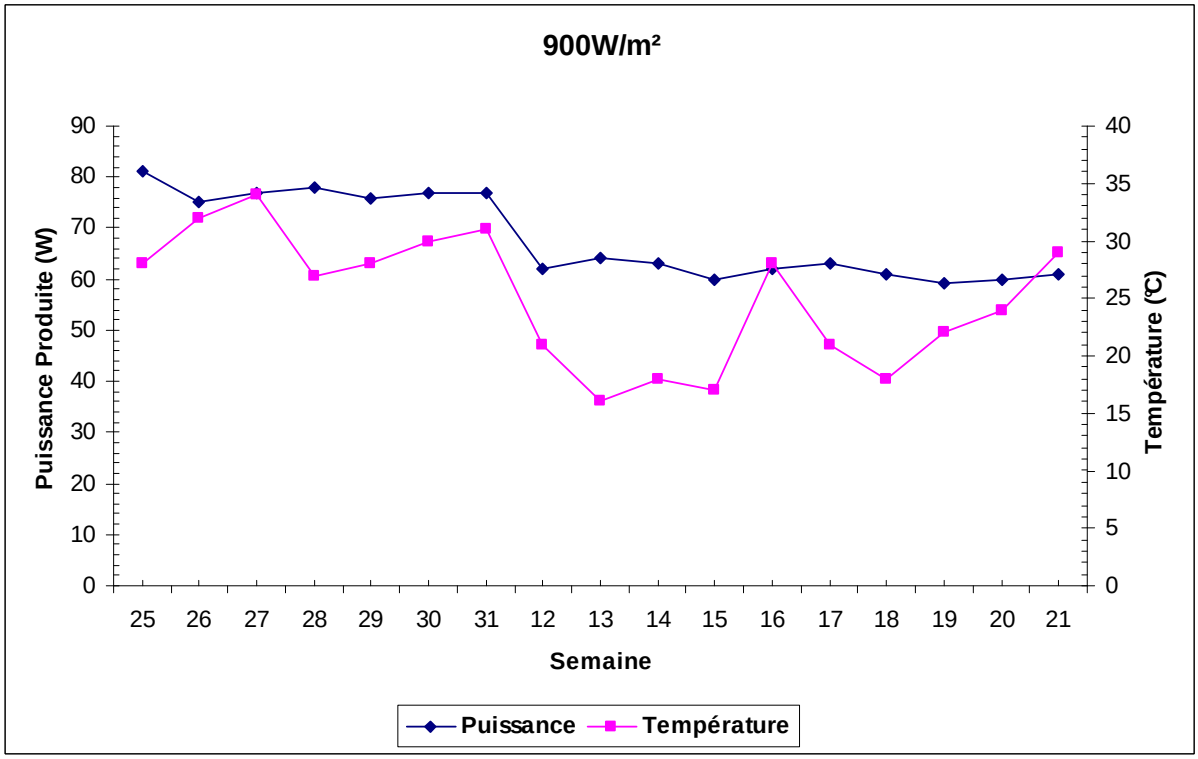


Figure 168 : *Puissance électrique produite pour 890 à 910 W/m² de radiation solaire*

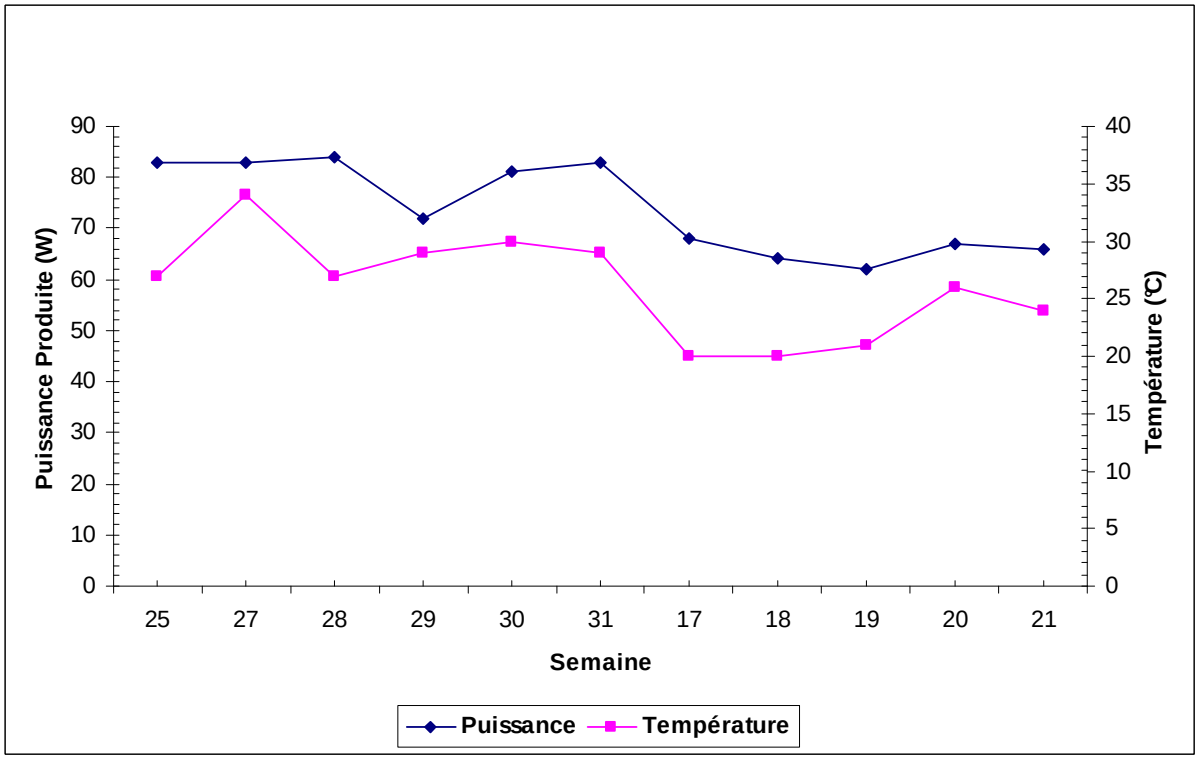


Figure 169 : *Puissance électrique produite pour 990 à 1010 W/m² de radiation solaire*

Il semble que la courbe du rendement soit décroissante. La cellule à certainement vieillie, il n'est pas possible d'affirmer cela car nous n'avons qu'un an de données. Toutefois, son aspect semble dégradé, les lignes de la grille sur le panneau sont oxydées.

Pour vérifier cette hypothèse, il a été décidé de tracer les courbes de puissance pour chacune des valeurs des centaines de puissances lumineuses à +/- 10 w/m². Sur le même graphique, les valeurs de température sont reportées dans les graphiques visibles sur les Figure 160 à Figure 169.

Tableau 35 : *Résultats*

Items	Résultats
Nombre de semaines de mesures	44
Energie totale produite (kW.h)	39,099
Energie totale reçue (kW.h/m²)	873,33
Moyenne de production par semaine (kW.h)	0,89
Moyenne d'énergie reçue par semaine (kW.h/m²)	19,85
Nombre de cycles	2012
Moyenne nombre de cycles par semaine	45,72

V.1.B.e Conclusion

Les mesures montrent que le store produit plus d'énergie électrique en période d'été et de printemps qu'en période hivers et d'automne. Le rendement brut et le rendement net sont quasiment égaux en période printemps/été. Ceci semble logique, les jours sont plus longs et le temps d'ouverture du store est optimisé.

Les 44 semaines de mesures effectuées ont permis de tester le mécanisme du store (ouverture & fermeture) et de s'apercevoir de certains problèmes inhérents à la cellule.
Il semble d'après les données que les cellules subissent une dégradation dans le temps due à l'enroulement et probablement aux conditions météorologiques. Il faut cependant continuer à enregistrer la production du store pour en être sûr.

V.1.B.f Test comparatif

Ce test a pour but de connaître les différences de fonctionnement des panneaux constitués de cellules en silicium amorphe que nous utilisons et des panneaux rigides commercialisés. La référence choisie est un panneau constitué de cellules en silicium monocristallin.

Tout comme l'installation précédente, celle-ci a été réalisée de manière à pouvoir l'améliorer et y ajouter des échantillons à tester.

Il est prévu en outre d'ajouter un panneau composé de cellules organiques. Le même logiciel que celui utilisé pour le store test a été repris.



Figure 170 : *Comparatif installé sur le toit de l'usine, de gauge à droite : Panneau silicium amorphe PowerFilm Solar®, panneau silicium amorphe Flexcell®, panneau monocristallin Cenit 80/80*

Tableau 36 : *Caractéristiques des prototypes à comparer*

Grandeurs	Prototypes		
Technologie	Monocristallin	Silicium amorphe	Silicium amorphe
Marque	Cenit 80/80	PowerFilm Solar®	Flexcell®
Dimension totale (m²)	0,686	1	0,60
Dimension active (m²)	0,48	0,51	0,44
Angle d'exposition	30°	30°	30°
Coordonnées Gps	Latitude : 50.65 Longitude : 3.12	Latitude : 50.65 Longitude : 3.12	Latitude : 50.65 Longitude : 3.12

Pour comparer le rendement des différents panneaux, nous avons préféré que ceux-ci aient la même surface active.

Tableau 37 : *Données techniques des cellules à comparer*

Modèle	Cenit 80/80	PowerFilm Solar®	Flexcell®
P (Wc)	80	20,4	27,1
Voc(V)	20,23	22	33,5
Isc (A)	4,74	2,035	1,27
Vmp	19,09	15,4	26,7
Imp (A)	4,15	1,65	1,03
α température Voc (%/℃)	-0,38	-0,2	-0,237
α température Isc (%/℃)	0,052	0,01	0,086
a température Pmpp (%/℃)	-0,49	-0,2	-0,15
Poids panneaux (kg)	9	0,54	1,306
Dimension totale (m²)	0,636	0,6	1
Epaisseur (mm)	34	1,00	1,5
Température de fonctionnement	-40/85℃	-40/85℃	-40/85℃

La fiche technique du panneau monocristallin utilisé est visible en [81].

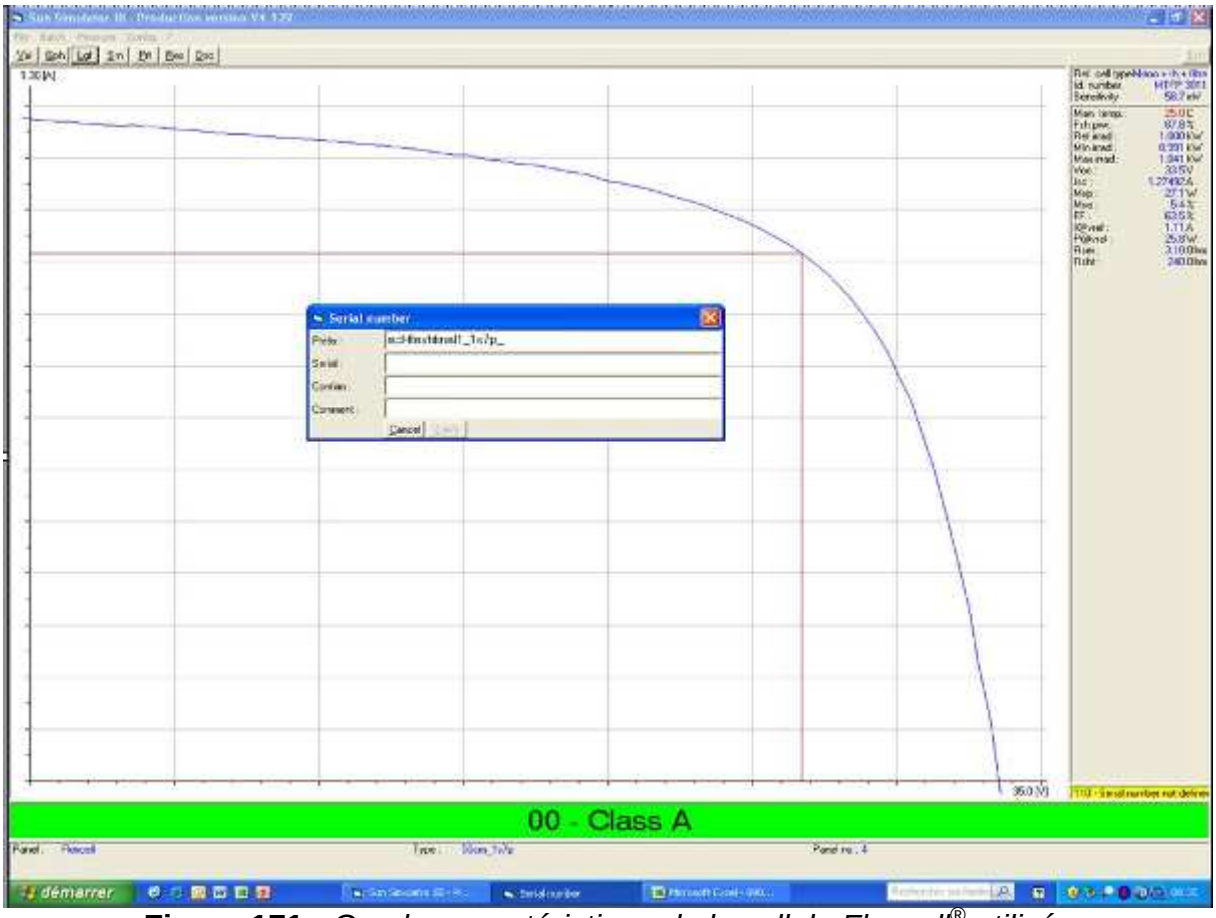


Figure 171 : *Courbe caractéristique de la cellule Flexcell® utilisée*

V.1.B.g Les charges

Dans un premier temps, des batteries ont été placées avec des régulateurs de charges de marque IVT 10 A équipé d'un MPPT et d'une reconnaissance automatique de tension (12 ou 24 V).
La plage de tension d'entrée est comprise entre 5 et 60 V. Cependant, le protocole de test ainsi établi avait un problème d'équilibre. Une fois la batterie chargée, nous étions obligé de la décharger alors que la cellule était en court-circuit. Or, toutes les batteries n'étant pas reliées à une cellule d'efficacité similaire, la vitesse de charge était très différente.

Lors de la semaine 50 de l'année 2009, le système a été modifié, des charges électroniques équipées de dissipateurs thermiques maintenant la tension des cellules à leur tension nominale ont été installées. Celles-ci ont été développées et fabriquées spécifiquement pour ce protocole de test.

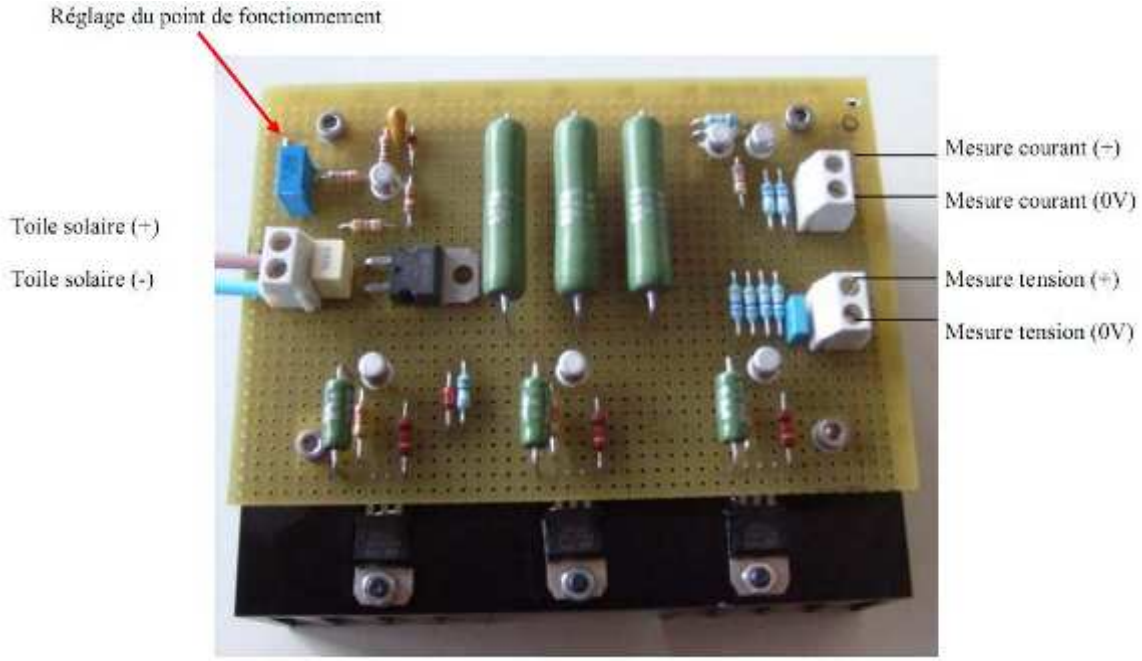


Figure 172 : *Charge électronique*

V.1.C. Résultats

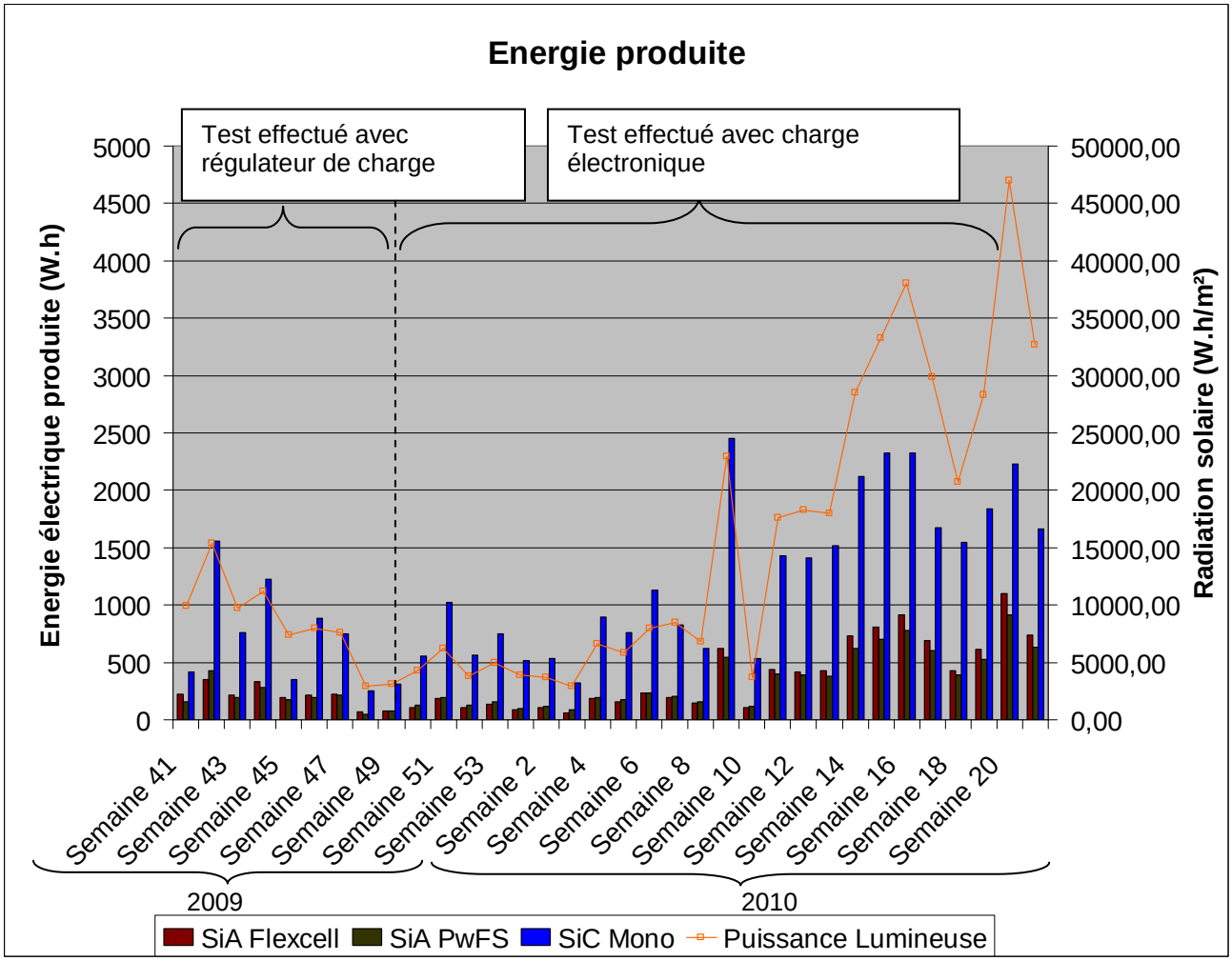


Figure 173 : *Cumul d'énergie produite par les 3 panneaux photovoltaïques*

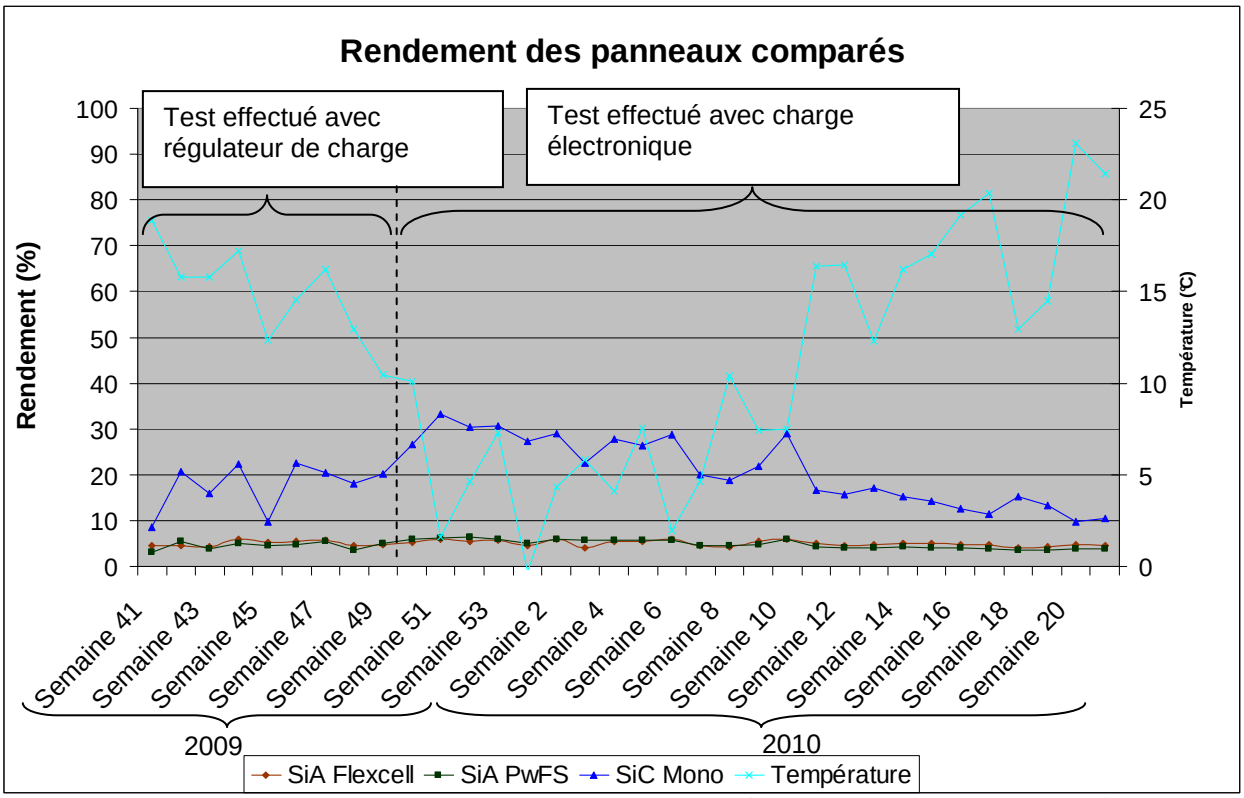


Figure 174 : *Rendements des panneaux Flexcell® (Si-a)/ PowerFilm Solar® (a-Si)/Cenit (c-Si)*

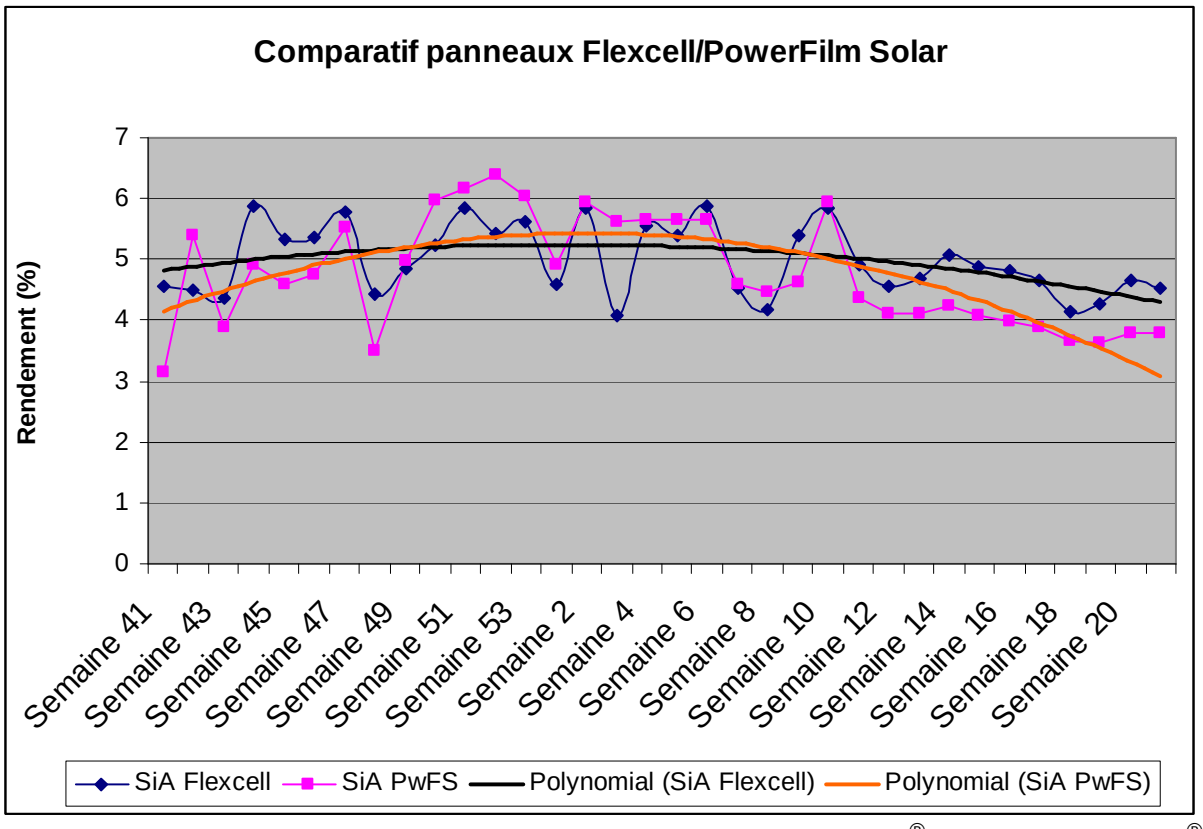


Figure 175 : *Comparatif des rendements des panneaux Flexcell® / PowerFilm Solar®*

On s'aperçoit que le changement de charge opéré en semaine 50 n'a pas eu d'impact sur le fonctionnement du protocole de test.

La Figure 173 montre que le panneau photovoltaïque en silicium cristallin a une production supérieure à celle des panneaux en silicium amorphe. L'écart avec la technologie silicium amorphe est très important les semaines d'hiver, il diminue cependant au printemps. Cela s'explique par les coefficients en température qui sont plus élevés pour le panneau en silicium monocristallin. Il apparaît nettement sur la Figure 173 que le panneau Flexcell a une production supérieure au panneau PowerFilm Solar® lorsque le cumul d'énergie solaire reçu est supérieur à 8000 W.h/m².

La Figure 174 montre que le rendement du panneau monocristallin calculé avec la surface active de cellule est supérieur à la technologie du silicium amorphe. Ce rendement avoisine 20 %. Bien que ce rendement soit irrégulier, il semble qu'en hiver il soit supérieur aux valeurs obtenues en Automne et au Printemps. Ceci est directement lié à l'impact de la température sur le panneau. Les panneaux Flexcell et PowerFilm Solar® ont quant à eux un rendement inférieur (respectivement 4,9 % et 4,7 %). Le rendement est très régulier tout au long de la période de mesure.

L'aspect visuel des panneaux Flexcell et Cenit n'a pas été modifié. En revanche, tout comme sur le store test décrit précédemment, la grille du panneau PowerFilm Solar® s'est oxydée. Il en résulte que cette cellule ne peut être utilisée sans risquer que les clients ne puissent remarquer ce défaut. Depuis la semaine 16, le rendement de la cellule PowerFilm Solar® est passé en dessous de 4%, il avoisine 3,8% alors que cette valeur n'avait été atteinte que lors des semaines 41, 43, 48, de l'année 2009. Cette baisse était alors espacée tandis que le seuil des 4% n'a pas été atteint depuis la semaine 16 de l'année 2010. La courbe de tendance du panneau PowerFilm Solar® sur la Figure 175 est beaucoup plus concave que la courbe Flexcell®. Il faut continuer l'observation pour voir l'évolution des cellules dans le temps.

V.1.D. Conclusion

Les deux types de tests montrent que les cellules peuvent se dégrader dans le temps. Pour connaître la dégradation du panneau, il est important de continuer à observer les mesures des cellules. Le panneau monocristallin a un rendement surfacique 4 fois plus important que les panneaux en silicium amorphe. Sa masse volumique et sa rigidité sont cependant des freins à son utilisation.

L'enroulement peut avoir un effet sur la cellule PowerFilm Solar®. Un store test de même dimension va être monté avec des panneaux Flexcell®. Ceci permettra de connaître l'évolution du panneau Flexcell®.

Dans un deuxième temps, des cellules de marque Fuji-Electric de technologie tandem a-Si / GeSi-a et des cellules organiques Konarka vont être ajoutées sur le banc du test comparatif. Ainsi, d'autres technologies et marques vont pouvoir être étudiées pour réaliser la toile photovoltaïque. L'observation de l'évolution de ces technologies nous permettra de rester en veille afin de concurrencer le rendement surfacique des cellules rigides.

VI. Conclusion générale

L'intégration de cellules photovoltaïques souples sur une structure textile telle que le store banne pour résidences et camping-cars a été complètement réalisée dans le cadre de ce travail de recherche. Ainsi, une nouvelle dénomination de toile photovoltaïque trouve enfin sa légitimité. C'est un produit qui apporte une nouvelle solution de production d'énergie électrique innovante. Son poids, sa flexibilité et sa finesse confèrent au produit des critères de performances intéressants comparativement à la surface déployée et à l'optimisation du volume de conditionnement du support textile.

Ce matériau textile composite possède plusieurs fonctions principales telles que la production d'énergie électrique, le confort thermique et la protection aux UVs.

La problématique majeure actuelle dans le domaine du transport est la réduction du poids des structures et plus particulièrement dans le domaine du véhicule appliqué au camping-car. Aussi la toile photovoltaïque répond parfaitement aux besoins de coupler une fonctionnalité de production d'énergie à l'allégement d'une structure existante.

Concernant l'habitat, les possibilités sont encore plus étendues. Par exemple, dans le domaine de l'habitat souple (tente, abris…) la toile photovoltaïque permet une autonomie énergétique. Dans le cas de l'habitat rigide (maison, bâtiment…) on peut diminuer sa facture énergétique en revendant l'énergie produite aux fournisseurs d'électricité.

La réalisation de prototypes a permis de montrer la pertinence de ce projet ainsi que sa faisabilité. Pour concurrencer les autres technologies, il faut privilégier des stores de très grandes dimensions (4×6 m) ou encore un nombre important de stores photovoltaïques.

Il est cependant recommandé d'utiliser des armatures solides pour résister au vieillissement et à l'augmentation de poids induite par l'ajout de la cellule photovoltaïque sur le tissu. La solution optimale consiste à utiliser un store de type coffre permettant de protéger au mieux le panneau lorsque celui-ci est rangé.

Pour l'entreprise Dickson-Constant, l'avantage de ce projet réside dans le fait que les technologies photovoltaïques souples ne sont pas répandues, limitant ainsi les possibilités de concurrence. Cet avantage est aussi l'inconvénient du projet : le petit nombre de fournisseurs potentiels en phase industrielle peut limiter les volumes de production de stores photovoltaïques. Cependant, l'intérêt de l'entreprise pour une telle technologie lui donne un avantage de leadership. Ceci permet d'appréhender les différentes contraintes liées à la conception d'un tel produit.

La méthode de lamination développée dans le cadre de mon travail de recherche permet de laminer des cellules sur tissu de façon semi-continue sans utiliser de machine sous-vide. Le principal inconvénient de ce type de machine réside dans le fait que la lamination est assez longue et consommatrice d'énergie. De plus, il est

possible de laminer différents types de cellules avec cette méthode. En effet, la variation de pression, température et vitesse permet un nombre de combinaisons de réglages important.
La géométrie de la machine apporte de nombreux avantages : le contact plan entre le tapis et le cylindre chauffant, associé à un cylindre presseur, permet d'obtenir des niveaux d'adhérence cellule-textile importants.

Ces avantages combinés permettent de réaliser des laminations de toute technologie photovoltaïque sur tout type de support et apportent une solution innovante du processus de lamination optimisé qui répond à un besoin industriel.

Dans la perspective d'une amélioration constante du procédé de lamination, différents paramètres peuvent être modifiés. Un investissement matériel nouveau peut s'envisager afin d'augmenter la surface de contact entre le laminat et le rouleau de lamination. Cela permettrait d'augmenter les rayons de courbure du trajet de la préforme à laminer et éviter les différences de vitesses dues aux épaisseurs des préformes.

Pour adapter les prototypes de toile photovoltaïque à différents marchés géographiques et économiques et passer à la phase de production industrielle, des contraintes supplémentaires doivent être prises en compte. Par exemple, pour le domaine résidentiel en France, la première version du produit doit être certifiée selon les normes IEC 61646 [26] et 61730 [27] afin de bénéficier des crédits d'impôts ou du droit de revente d'électricité aux fournisseurs. Pour cela, il faut s'orienter vers les fournisseurs de panneaux photovoltaïques dont les cellules photovoltaïques sont déjà certifiées. En effet, il est possible en accord avec le fournisseur d'effectuer des extensions de certifications pour éviter de certifier tout le complexe photovoltaïque.

Les recherches actuelles dans le domaine du photovoltaïque sont nombreuses et variées. Il est intéressant d'entretenir une connaissance globale et avisée sur ces futurs développements à l'échelle laboratoire et prometteurs pour nos applications actuelles. La démarche d'identification que nous avons effectuée de la solution photovoltaïque nous a permis de mettre au point un produit innovant répondant aux critères d'une production à l'échelle prototype.

Cependant, les mesures effectuées sur les différents prototypes montrent que la technologie utilisée n'a pas encore toute les capacités en termes de rendement surfacique afin de se substituer aux technologies rigides les plus abouties.
L'apparition d'industrialisation de fils photovoltaïques ou de cellules photovoltaïques directement imprimables sur supports souples pourrait ouvrir des perspectives d'intégrations très intéressantes aux textiles.

La connectique peut aussi être un axe d'amélioration, celle qui permet de faire l'interface entre la toile photovoltaïque et les câbles ou entre la cellule et la toile. Cet axe d'amélioration est complexe et nécessite de prendre en compte tous les paramètres liés à l'optimisation du transport de l'énergie électrique, du vieillissement ainsi que la sécurité des biens et des personnes. Cette complexité s'en trouve amplifiée par les contraintes liées au développement industriel de notre solution innovante. De plus, pour des questions de confidentialité, cet axe n'a pas pu être développé au sein de l'entreprise Dickson-Constant.

En s’appuyant sur la maîtrise du procédé de lamination développée dans le cadre de mes travaux de recherche, des améliorations du produit composite textile peuvent être prospectées. Certaines solutions telles que la métallisation ou l’utilisation de fils électriques conducteurs peuvent être imaginées.

De plus, l’utilisation d’une diode plate et d’épaisseur fine pourrait permettre l’intégration des systèmes de protection des panneaux photovoltaïques directement dans la préforme. Cependant, une telle solution empêche le remplacement des diodes dans le cas de leur dysfonctionnement.

La problématique du recyclage de la toile photovoltaïque développée a été prise en compte. La solution préconisée consisterait à confier ce déchet à une entreprise spécialisée dans le recyclage des métaux et des polymères.

Cette solution innovante a fait l’objet de dépôts de brevets à l’échelle nationale française dont les références sont FR 0855832 et FR 0855829 ainsi qu’une demande d’extension à l’échelle européenne (EP 2 159 848 A1 et EP 2 159 849 A2) et internationale.

Références bibliographiques

1. **Ricaud. A**, L'électricité photovoltaïque, Cythelia, Nov 2009, p 55
   Disponible sur le site :
   http://www.cythelia.fr/images/file/L-electricite-photovoltaique.pdf
   Consulté le 01/07/2010.

2. **International Energy Statistics**, Electricity/Heat in World in 2007, [en ligne]
   Disponible sur le site :
   http://www.iea.org/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=29&Submit=Submit
   Consulté le 01/07/2010.

3. **Ching-Tang Huanga, Chien-Fa Tangb, Ming-Chen Leeb et al**, Parametric design of yarn-based piezoresistive sensors for smart textiles, Sensors actuators, Science Direct. 2008, vol. 148, p10-15.

4. **Katragadda. R. B, Xu. Y**, A novel intelligent textile technology based on silicon flexible skins, Sensors and Actuators, Science Direct. 2008, 143, p 169–174.

5. **Gimpel. S, Möhring.U ,. Neudeck. et al**, Integration of Microelectronic Devices in Textiles, Smart Textiles And Flexible Systems, international newsletter on micro-nano integration. 2005, p 14-15.

6. **Martinez. F, Obieta. G, Uribe. I, et al**, Polymer-Based Flexible Strain Sensor, Procedia 1 Chemistry, Science Direct. 2009, vol. 143, p 915–918.

7. **Hildera. M., Winther-Jensenb.B, Clark. N. B**, Paper-based, printed zinc–air battery, Journal of Power Sources, Science Direct. 2009, vol. 194, p 1135–1141.

8. **Taillet. R, Villain. L, Febvre. P,** Dictionnaire de physique 2nd Ed, Bruxelles : de boeck, Nov 2009, p741.

9. **Guillot.F.M**, Piezoelectric Fabrics for Energy Harvesting, [en ligne], National Textile Center Annual Report, Nov 2007, p 10.
   Disponible sur: http://www.ntcresearch.org/pdf-rpts/AnRp07/F06-GT05-A7.pdf
   Consulté le 01/07/2010.

10. **Kallmayer. C, Linz. T, Aschenbrenner.R et al**, System Integration Technologies for Smart Textiles, Smart Textiles And Flexible Systems, international newsletter on micro-nano integration, 2005, p 42-43.

11. **Ricaud. A**, Convertisseurs photovoltaïques, [en ligne], Cythelia, Nov 2007, p 84.
    Disponible sur le site :
    http://www.cythelia.fr/images/file/Convertisseurs%20photovoltaiques_Alain%20Ricaud_Nov-07.pdf

Consulté le 01/07/2010.

12. **Martinuzzi. S**, Les cellules solaires au silic.ium cristallin, Reflets de la Physique, Dossier Photovoltaïque, Déc. 2007, p 11-13

13. **Honsberg. C, Bowden.S**, PV CDROM, [en ligne].
Disponible sur le site :
http://pvcdrom.pveducation.org/index.html
Consulté le 01/07/2010.

14. **Beck. W, Dolmans. D, Hall. A, Dutoo. G**, Solar Shading, How to integrate solar shading in sustainable buildings, Jan 2010, p 94.

15. Meteotest, Juin 2008, [en ligne].
Disponible sur le site : http://www.meteonorm.com/
Consulté le 01/07/2010.

16. **Šuri. M, Cebecauer. T, Huld. T, Dunlop. E.D,** PVGIS European Community, 2001-2008, [en ligne], Global Irradiation and solar electricity potential, Horizontally mounted modules, France
Disponible sur le site :
http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmaps/eu_hor/pvgis_solar_horiz_FR.png
Consulté le 01/07/2010.

17. **Jäger-Waldau.** A, PV Status Report, Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics, [en ligne], 2009, p 118.
Disponible sur le site : http://re.jrc.ec.europa.eu/refsys/pdf/PV-Report2009.pdf
Consulté le 01/07/2010.

18. **Herring. G, Hirshman. W. P,** Germany installs more PV in 2009 than the rest of the top 10 national markets combined, Photon International, Fev 2010, p 50-61.

19. **Durand. Y. S, Jacquin. P,** Solar Photovoltaic Electricity Applications in France National Survey Report 2008, [En ligne], International Energy Agency, Nov 2009, Disponible sur le site :
http://www.iea-pvps.org/countries/download/nsr08/NSR_France%202008.pdf
consulté le 01/07/2010.

20. **Nowak. S,** TRENDS IN PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS, [En ligne], Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008, Sept 2009,
Disponible sur le site : http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1_18.pdf
consulté le 01/07/2010.

21. **CEN,** Véhicules habitables de loisirs - Installations électriques à très basse tension de 12 V en courant continu - Partie 2 : Autocaravanes, EN 1648-2, 2005, p 15.

22. **DGEMP – Dideme,** Critères d'éligibilité des équipements de production d'électricité photovoltaïque pour le bénéfice de la prime d'intégration au bâti, Avr 2007, p 8.
Disponible sur le site :
http://www.drire.gouv.fr/alsace/energie/telechargement/guide-integration%20bati.pdf
Consulté le 01/07/2010.

23. **EDF,** Le parcours du producteur solaire en Obligation d'Achat, [En ligne], Jan 2010,
Disponible sur le site :
http://www.edf-oasolaire.fr/docs/Parcours_producteurPV_20103001.pdf
Consulté le 01/07/2010.

24. **ADEME,** Générateur Photovoltaïques raccordés au réseau, Spécifications techniques relatives à la protection des personnes et des biens, [En ligne], 2006.
http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=B2773E11F5F34A888E8FD39EC2A7AB591170860147412.pdf
Consulté le 01/07/2010.

25. **Sabonnadière. J.C,** Nouvelles technologies de l'énergie 1, Paris : Lavoisier, 2006, p 303.

26. **Afnor,** Modules photovoltaïques (PV) en couches minces pour application terrestre – Qualification de la conception et homologation, CEI 61646, 1996, p83.

27. **Afnor,** Qualification pour la sûreté de fonctionnement des modules photovoltaïques (PV), NF EN 61730-2, 2007, p32.

28. **Ricaud. A,** Modules et systèmes photovoltaïques, [En ligne], Sept 2009, p162
Disponible sur le site :
http://www.cythelia.fr/images/file/Systemes%20PV_Alain%20Ricaud_Sept-09%20V2.pdf
Consulté le 01/07/2010.

29. **ADEME,** Protection contre les effets de la foudre dans les installations faisant appel aux énergies renouvelables, Sophia Antipolis, [En ligne], 2001, p 67.
Disponible sur le site : http://www.s2j-france.fr/iso_album/guide_foudre.pdf
Consulté le 01/07/2010.

30. **Flexcell®,** [En ligne].
Disponible sur :
http://www.flexcell.com/index.php?option=com_content&task=view&id=66&Itemid=46
Consulté le 01/07/2010.

31. **PowerFilm solar®**, [En ligne].
Disponible sur :
http://www.powerfilmsolar.com/foldable-solar-chargers/foldable-products.php
Consulté le 01/07/2010.

32. **Ricaud. A**, Modules photovoltaïques, Technique de l'ingénieur, p 16

33. **Bourée. J. E , Roca i Cabarrocas. Père,** Cellules solaires en couches minces à base de silicium, Reflets de la Physique, Dossier Photovoltaïque, Déc. 2007, p 11-13.

34. **Gleskova. H, I-Chun Cheng, Wagner.S, Sturm J.C, Suo.Z.** Mechanics of thin-film transistors and solar cells on flexible substrates, Solar Energy, Science Direct., 2006, vol. 80, p 687–693.

35. **Abdo. F,** Croissance De Couches Minces De Silicium Par Epitaxie En Phase Liquide A Basse Temperature Pour Applications Photovoltaïques, Thèse Matière condensée surface et interface. Thèse. Lyon : INSA de Lyon, 2007, p 153.

36. **Romeoa. A, Khrypunova.G, Kurdesaua.F,** High-efficiency flexible CdTe solar cells on polymer substrates, Solar Energy Materials & Solar Cells, Sciences Direct, Vol. 90, 2006, p 3407-3415.

37. **Otte. K, Makhova. L, Braun. A,** Flexible Cu(In,Ga)Se2 thin-film solar cells for space application, Thin Solid Films, Sciences Direct, vol. 79, 2006, p 613 – 622.

38. **Green. M. A., Emery. K, Hishikawa.Y, Warta. W,** Solar Cell Efficiency Tables (Version 33), Prog. Photovolt: Res., vol. 17, 2009, p 85–94.

39. **Bullis. K,** Better Plastic Solar Cells Improved dyes and electrolytes could make the Grätzel solar-cell design more practical, [en ligne], MIT Review, 2008.
Disponible sur : http://www.technologyreview.com/energy/21649/?a=f
Consulté le 01/07/2010.

40. **Destruel.P, Seguy.I,** Les cellules photovoltaïques organiques, Reflets de la Physique, Dossier Photovoltaïque, Déc. 2007, p 25-32.

41. **Krebs. F. C,** Fabrication and Processing of Polymer Solar Cells : A review of printing and coating techniques, Solar Energy Materials & Solar Cells, Science Direct, vol. 93, 2009, p 394–412.

42. **Lik Hang Chau. J, Tang Chen.R, Lin Hwang.G et al,** Transparent solar cell window module, Solar Energy Materials & Solar Cells, Sciences Direct, Vol. 94, 2010, p 588–591.

43. **Zou.D, Wang.D, Chu.Z, Lv.Z, et al,** Fiber-shaped flexible solar cells, Coordination Chemistry Reviews, Sciences Direct, 2010, p 10.

44. **Gay. D,** Matériaux Composites 2 de Ed, Paris : Hermes, p 485.

45. **Closset. A,** Photovoltaic device, WO 2004/077576 A1, 10 Sept 2004.

46. **Closset. A,** Photovoltaic device, WO 2004/077577 A1, 10 Sept 2004.

47. **Maung. K. J, Hahn. H. T, Ju. Y. S.,** Multifunctional integration of thin-film silicon solar cells on carbon-fiber-reinforced epoxy composites, Solar Energy, Sciences Direct, vol. 84, 2010, p 450–458.

48. **Flexcell,** Fiche technique produit "Sunboard" , [En ligne],
Disponible sur :
http://www.flexcell.com/images/Consumer/sunboard_fiche_new.pdf
Consulté le 01/07/2010.

49. **PowerFilm Solar®,** Fiche technique produits pliables, [En ligne],
Disponible sur :
http://www.powerfilmsolar.com/foldable-solar-chargers/foldable-products.php
Consulté le 01/07/2010.

50. **ftlsolar.com,** fiche technique produit PromoMod - 20' × 20', [En ligne],
Disponible sur :
http://www.ftlsolar.com/pdf/PromoMod.pdf
Consulté le 01/07/2010.

51. **Shadeplex,** Photos – ShadePlex Demo Installation, [En ligne],
Disponible sur :
http://www.ftlsolar.com/pdf/PromoMod.pdf
Consulté le 01/07/2010.

52. **O'Dell. H,** Intelligent shading helps save energy, Awnings & shades, Special fabrics review, Jan 2010, p

53. **Ftlsolar,** fiche technique produit PowerPark I, [En ligne],
Disponible sur :
http://www.ftlsolar.com/pdf/PowerPark%20I.pdf
Consulté le 01/07/2010.

54. **Ftlsolar,** fiche technique produit PowerPark II, [En ligne],
Disponible sur :
http://www.ftlsolar.com/pdf/PowerPark%20II.pdf
Consulté le 01/07/2010.

55. **Uni-solar®,** fiche technique produit PVL-144, [En ligne],
Disponible sur :
http://www.uni-solar.com/wp-content/uploads/pdf/PVL-144_EN.pdf
Consulté le 01/07/2010.

56. **Kreutzmann. A, Siemer. J,** Smooth Sailing, Photon International, Fev 2010, p 136-169

57. **Flexcell,** Buiding Integrated photovoltaic, fiche technique membrane FLX-TO200, [En ligne], http://www.flexcell.com/images/BIPV/flexcell_roofing_membrane.pdf Consulté le 01/07/2010.

58. **Uni-solar®,** fiche technique produit PVSL-68, [En ligne], Disponible sur : http://www.uni-solar.com/wp-content/uploads/pdf/PVSL-68_EN.pdf Consulté le 01/07/2010.

59. **Uni-solar®,** fiche technique produit PVSL-136, [En ligne], Disponible sur : http://www.uni-solar.com/wp-content/uploads/pdf/PVSL-136_EN.pdf Consulté le 01/07/2010.

60. **Hanak. J.J, Young. J, Kuypers. B, Blieden. R,** Retractable power supply, US 4636579, 13 Janvier 1987.

61. **Müller. H. F**, Markise mit flexiblen Solarmodulen, DE 198 25 017 C 1, 23 Septembre 1999.

62. **Lambey. J,** Toile Photogénératrice et support pour une telle toile, FR 01/05176, 17 Avril 2001

63. **Lambey. J,** Fabric generating electric current from sunlight and support for same, WO 2 823 527-A1, 17 Avril 2001.

64. **Goulpie. P,** Prototype de store solaire photovoltaïque, [En ligne], Yverdon, Juin 2005. Disponible sur : http://www.eivd.ch/jt06/doc/JT06jfaffolter_pgoulpie_descr.pdf Consulté le 01/07/2010.

65. **CEN.** Fermetures, stores extérieurs et stores intérieurs — Terminologie, glossaire et définitions, EN 12216, 2001, p 84.

66. **Mr Store.** Stores Bannes Général - L'Armature, [En ligne] Disponible sur : http://mstore.fr/amenagements-exterieurs/stores-bannes/52-stores-bannes-general.html?start=1 Consulté le 01/07/2010.

67. **Meyer. J,** Reste-t-il un avenir pour le coton ?, Technic Baie, N°19, Oct 2007.

68. **Ben ahmed. H, b. Multon. b, l. Prevond. l, j. Lucidarme. J,** Actionneur linéaire intégré pour application domotique, Revue 3EI juin 2000, p 48-59.
Disponible sur le site :
http://reglisse.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page_SystemesEM_HautesPerf/ActionLineaire_3EI_2000.pdf
Consulté le 01/07/2010.

69. **Somfy,** Produit, Qualité. [En ligne]
Disponible sur le site :
http://www.somfy.fr/accueil/decouvrir/nos-produits/qualite.html
Consulté le 01/07/2010.

70. **Somfy,** Produit, Stores extérieurs. [En ligne]
Disponible sur le site :
http://www.somfy.com/export/index.cfm?page=/export/home/products/awnings&language=fr-fr#
Consulté le 01/07/2010.

71. **UTE,** Guide UTE C15-712**,** Installations électriques à basse tension, 2008, p 32

72. **Mauclerc. J.C, Aubert. Y, Domenach.A,** Guide du technicien en électrotechnique, Paris : Hachette Livre, 2003, p 288

73. **SER,** Etat du parc solaire photovoltaïque au 31 décembre 2009, [En ligne], p 20
Disponible sur le site :
http://www.enr.fr/docs/2010143127_07ParcPVdec2009SOLERv10032010.pdf

74. **SMA,** SB 1200 / SB 1700, [En ligne], p2
Disponible sur le site :
http://download.sma.de/smaprosa/dateien/5682/SB1200_1700-DFR094610.pdf

75. **Mastervolt,** Soladin 600 (160-700 Wp), [En ligne],
Disponible sur le site :
http://www.mastervolt.com/view_product.php?lang=4&section=solar_grid&prggr_id=1159&prg_id=1102&pro_id=5489

76. **CEN,** Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique – Détermination de l'adhérence du revêtement, NF EN ISO-2411, p12.

77. **3-S Swiss Solar Systems Ag,** [En ligne],
Disponible sur le site :
http://www.3-s.ch/en/3s-homepage/

78. **Chaintreuil. N, Barruel. F, Le Pivert. X, Buttin. H, Merten, J**, Shadowing effects on grid connected PV systems, Book of Preprints, INES, Sept 2008.

79. **Guérin de Montgareuil. A, Mezzasalma. F, Merten. J,** Application of the MOTHERPV method to the accurate monitoring of the grid-connected photovoltaic systems, Book of Preprints, INES, Sept 2008.

80. **Ihara.T, Nishihara. H,** Studies on the outdoor performances of Amorphous Silicon Solar cells de Fuji Electric, Fuji Electric Review, vol. 49 N°2, 2003, p 49-54.
Disponible sur le site :
http://www.fujielectric.com/company/tech/pdf/r49-2/r49-2.pdf
Consulté le 01/07/2010.

81. **Issol, Caractéristiques des Modules,** [en ligne]
Disponible sur le site :
http://www.issol.eu/site/FCK_STOCK/File/data%2020cenit.v2%2020FR.pdf
Consulté le 01/07/2010.

82. **Pern F.J,** PV Module Encapsulation – Materials, Process, and Reliability, 16th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells and Modules: Materials and Processes, 2006, p 11-122.

83. **El Amrani. A, Mahrane. A, Moussa.F.Y. et al,** Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre, Energ. Ren., 2006, vol. 9, p 37-42.

84. **BOST. J,** Matières Plastiques, 2ème Ed. Paris : Lavoisier, 1985, p 455.

85. **DeBergalis.M,** Fluoropolymer films in the photovoltaic industry, Journal of Fluorine Chemistry, Science Direct. 2004, vol. 125, p 1255–1257.

86. **Brandrup.J, Immergut. E. H, Grulke. E. A,** Polymer Handbook, 4 ème Ed. New-York: John Wiley, 1999, p 2336.

87. **Czanderna. A. W, Pern.F. J,** Encapsulation of PV modules using ethylene vinyl acetate copolymer as a pottant: A critical review, Solar Energy Materials and Solar Cells Science Direct, 2004, vol. 43, 1996, p 101-181.

88. **Lapprand. A,** Modification Chimique des polyuréthanes thermoplastiques : Etude des réactions chimiques menant à de l'autoréticulation et de la microorganisation physique, pour le contrôle des propriétés, Matériaux polymères et composites, Lyon : INSA Lyon, 2005, p 228.

89. **Mei. F, Sullivan. J, Choi. G et al,** Large area thin film solar module lamination, [en ligne], Photovoltaics International,
Disponible sur le site :
http://www.photovoltaïques-tech.org/images/uploads/articles_online_pdf/large_area_solar_module_lamination.pdf
Consulté le 01/07/2010.

90. **Billco Manufacturing, Equipment, Lami-Pro** [en ligne], Disponible sur le site : http://www.billco-mfg.com/section1/equipment/page4/laminating/subpage18/lami-pro Consulté le 01/07/2010.

91. **Italmatic, Autoclaves** [en ligne], Disponible sur le site : http://www.italmatic.net/catalogo/produits_scelta.asp?IDCAT=8&LINGUA=francais Consulté le 01/07/2010.

92. **Norton® ETFE Fluoropolymer Film,** [en ligne], Disponible sur le site : http://www.norton-films.com/uploadedFiles/SGNortonFilms-NA/Documents/HP/HPFilms-ETFE-AFF1006R.pdf Consulté le 01/07/2010.

93. **Etimex-Solar GmbH,** [en ligne], Disponible sur le site : http://www.etimex-solar.com/download/VISTASOLAR%20486.00_english_S.pdf Consulté le 01/07/2010.

94. **Afnor,** Textile-Détermination de la masse surfacique des tissus et des tricots, NF G 07 150, 1984, p 4.

95. **Afnor,** Textile-Détermination de l'épaisseur des textiles et produits textiles, et des tricots, NF EN ISO 5084, 1996, p11.

96. **Afnor,** Textile - Propriétés de déchirement des étoffes, NF EN ISO 13937-1, 2000, p 10.

97. **Afnor,** Textiles - Propriétés des étoffes en traction, NF EN ISO 13934-1, 1999, p13.

98. **Afnor,** Papier et carton- Détermination de la résistance à la flexion, ISO 2493, 1992, p 4.

99. **Afnor,** Textile-Détermination de la résistance à la pénétration de l'eau, NF EN 20811, 1992, p 7.

100. **McGreer. M,** Atlas: USA, Weathering Testing Guidebook, 2003, p112.

Annexes

Etat de l'art

Les matériaux utilisés

Il existe plusieurs types d'encapsulation. D'après Alain Ricaud, [11] deux philosophies s'opposent concernant l'encapsulation des modules photovoltaïques : certains pensent que les modules doivent être laminés de façon à être totalement imperméables et d'autres qu'il est impossible d'éviter toute perméabilité à l'eau.

Pour cette raison, la plupart des modules rigides fabriqués sont constitués soit :

- ✓ de deux plaques de verres entre lesquelles les cellules photovoltaïques sont placées (module bi-verre),
- ✓ face arrière constituée d'un matériau respirant et face avant en verre.

En effet, lorsque la vapeur d'eau pénètre dans le module, celle-ci peut-être évacuée par évaporation.

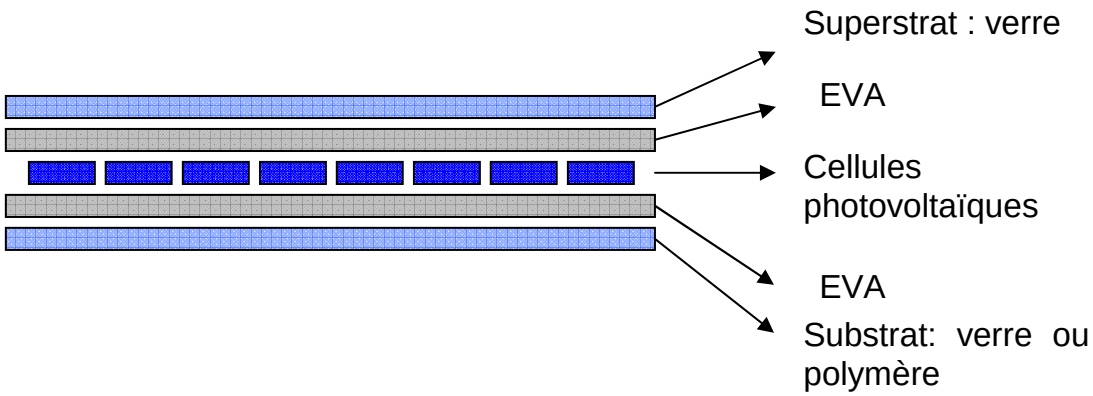


Figure A : *Constitution d'un module silicium cristallin photovoltaïque* [82]

Les modules souples sont encapsulés avec des matériaux flexibles à base de polymères. On trouve des assemblages en substrat ou en superstrat :

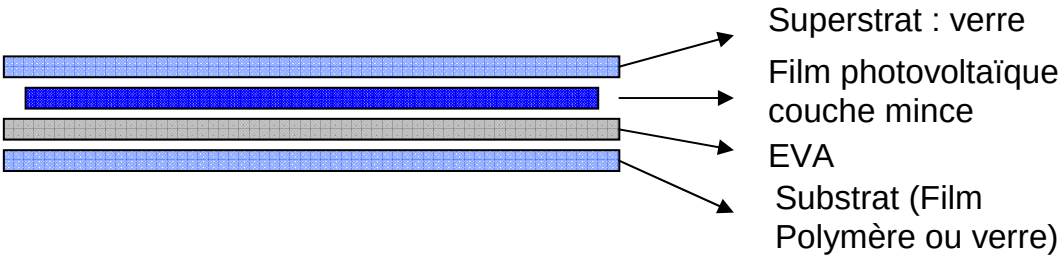


Figure B : *Constitution d'un module silicium cristallin photovoltaïque* [82]

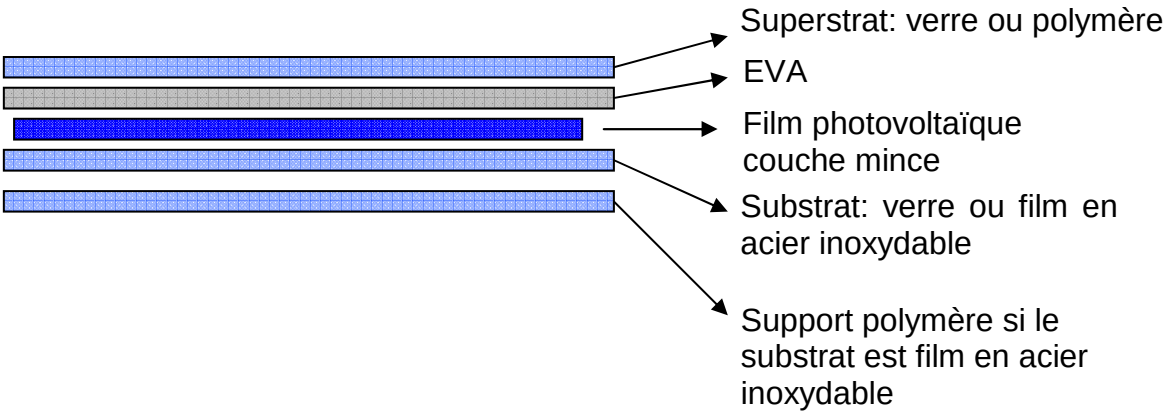


Figure C : *Constitution d'un module silicium cristallin photovoltaïque* [82]

Le choix des matériaux est important, il influence la durabilité des cellules et leurs performances. Les matériaux intéressants pour le projet sont ceux qui permettent d'obtenir le complexe le plus fin, le plus léger et le plus flexible possible.

Il est possible de classer ces matériaux en trois catégories distinctes :

1. Superstrat ;
2. Encapsulant ;
3. Substrat.

Les superstrats

Ces matériaux doivent avoir un coefficient de transmission lumineuse le plus important possible si la cellule est déposée en dessous de celui-ci. Les superstrats peuvent être en verre ou en polymère.

Le verre

C'est le superstrat le plus utilisé actuellement. Pour augmenter ses propriétés d'absorption de la lumière, la majorité des matériaux en verre utilisés sont des verres pauvres en métal pour éviter toute absorption de la lumière par les ions métaux dans le spectre visible et infrarouge. Après la découverte du jaunissement de l'EVA au début des années 1990, les plaques de verres ont été équipées de filtres contenant de l'oxyde de cérium pour réduire la décoloration de l'EVA. Depuis 1998, des traitements anti-réflexions peuvent être utilisés pour améliorer les performances des

cellules photovoltaïques. Pour éviter la réflexion de la lumière sur le verre, celui-ci peut être recouvert d'acide fluosilicique et recouvert de nano-pores. [83]

La rigidité du verre nous interdit son utilisation pour la conception de la toile photovoltaïque.

Films polymères

Les films polymères utilisés sont des fluoro-polymères ayant une bonne résistance aux conditions extérieures. Ils sont utilisés pour leur souplesse en association avec des cellules en silicium amorphe. Le plus couramment utilisé est l'ETFE (copolymère d'Ethylène tétrafluoroéthylène). D'autres polymères tels que le PVDF (polyfluorure de vinylidène) dont les propriétés sont proches de celles de l'ETFE ou PVF sont susceptibles d'êtres employés pour ces applications.

ETFE

L'ETFE est un copolymère composé d'éthylène tétrafluoroéthylène (CF2 = CF2 + CH2 = CH2) [84].

D'après Michael DeBergalis [Fluoropolymer films in the photovoltaic industry], le copolymère d'Ethylène tétrafluoroéthylène (ETFE) est la matière dont les propriétés sont les plus intéressantes pour substituer le verre. Le Tableau A montre les principales propriétés de l'ETFE de marque TEFZEL 200.

Tableau A : *Propriétés physique de l'ETFE Tefzel® (Dupont)* [85]

Selected properties of ETFE[a]

Property	Value	Method
Density, cc/cm^3	1.7	ASTM D792
Melting point, °C	270	
Tensile modulus, MPa	827	ASTM D638
Ultimate elongation, %	200	ASTM D887-64T
Maximum continuous use temperature, °C	150	
Visible light transmittance, %	91–95	

[a] Adapted from [8], values are for Tefzel® 200.

Encapsulant

L'encapsulant permet de faire la liaison entre le superstrat et la cellule. Il assure le rôle de support mécanique : la cellule doit adhérer de façon durable avec une bonne cohésion à ses superstrats (face avant ou face arrière). Les propriétés d'adhérence doivent être conservées en cas d'humidité ou de chaleur, il est donc préférable que celui-ci soit le plus imperméable possible. Ainsi, il apporte une protection physique supplémentaire aux cellules photovoltaïques. Celles-ci sont protégées grâce à la

résistance aux conditions environnementales extérieures de l'encapsulant. Sa haute résistance mécanique lui confère de la solidité. C'est pour cette raison que l'encapsulant doit pouvoir résister aux contraintes de déchirures ou de ruptures.

De plus, les propriétés optiques (index de réfraction et de transmission lumineuse) du matériau choisi doivent être suffisamment proches de celles du superstrat de la face supérieure qui est exposée au soleil. L'exposition aux UVs ne doit en aucun cas entraîner le jaunissement de celui-ci pour ne pas altérer ses propriétés de transmission lumineuse.

Pour éviter tout arc électrique, les matériaux ayant une haute résistivité volumique et rigidité diélectrique sont privilégiés : l'encapsulant joue aussi le rôle d'isolant électrique.

Il permet de séparer physiquement plusieurs cellules ou groupes de cellules dans le cas où ceux-ci seraient encapsulés ensembles et ce quelle que soit la technologie utilisée.

Les propriétés de dissipation thermique sont aussi recherchées afin de permettre d'évacuer au mieux la chaleur émanant des cellules lorsque celles-ci sont en fonctionnement.

Plusieurs polymères liquides ou sous forme de films peuvent remplir les fonctions énoncées pour encapsuler les cellules photovoltaïques. Le polymère le plus utilisé pour cette application est l'éthylène vinyle acétate (EVA) (PHOTON enquête encapsulant). Cependant, d'autres polymères sont aujourd'hui utilisés pour substituer l'EVA. Ainsi, les modules peuvent être encapsulés avec du silicone liquide, du polyvinyle butyral (PVB), du polyuréthane thermoplastique (TPU).

Substrat

Les substrats utilisés pour réaliser les cellules photovoltaïques peuvent être en verre ou en polymères multicouches.

Concernant les polymères multicouches, la description de la structure est faite par celle de chaque polymère le constituant. Par exemple, le modèle dyMat BkPYE de Coveme introduit sur le marché en 2009 est composé de 2 couches successives de polyéthylène téréphtalate et d'une couche d'éthylène vinyle acétate. L'ensemble des couches étant noté PET/PET/EVA.

De nombreuses combinaisons de polymères destinés à cette application sont aujourd'hui sur le marché.
En 2006, Material, Process and reliability [82] a recensé le Tedlar de Dupont comme le polymère le plus utilisé. Dans les compositions de structures des substrats. Cependant, la tendance à cette époque était déjà à la substitution progressive des films Tedlar par des films PET dont le coût est inférieur.

Aujourd'hui, le Tedlar a de nombreuses solutions alternatives. Le produit « Scotchshield Film 17T » développé par 3M Deutschkland GmbH en est un exemple. Ce substrat est composé de trois couches : THV/PET/EVA. Polypropylène

vinylidène fluoride (THV) polyéthylène téréphtalate (PET) éthylène vinyle acétate (EVA). D'autres entreprises telles qu'Isovolta ou Dunmore ont développé des substrats dont le Tedlar ne fait pas partie de la composition.

D'autres membranes type TPO (thermoplastique polyoléfine) peuvent être utilisées comme substrats. Flexcell pour ses applications souples utilise le matériau AlkorTOP®,

EVA

Description

L'Ethylène Vinyle Acétate peut être composé de 2 à 50 % d'acétate de vinyle. Les films clairs sont composés de 2 à 7% d'acétate de vinyle. Les adhésifs « hot melt » sont quant à eux composés de 18 à 40 % d'acétate de vinyle [86].

D'après les indications fournies lors de la consultation du Polymer Handbook, les propriétés de l'EVA sont les suivantes [86] :

- ✓ Densité : 0,93 à 0,957 g/cm3
- ✓ Module d'élasticité 6,2 à 28 Mpa
- ✓ Module de Flexion : 650 à 950 Mpa
- ✓ Rupture à l'élongation : aucune
- ✓ Température de ramollissement Vicat 76℃
- ✓ Bon comportement au vieillissement extérieur

L'EVA est utilisé depuis les années 80 pour la réalisation d'encapsulation des modules photovoltaïques. Il est encore aujourd'hui le copolymère le plus employé pour cette application. En effet il présente l'avantage d'être peu onéreux. Cependant, son principal défaut est son jaunissement lors de l'exposition aux UV. Czanderna et Pern ont décrit les principales causes de ce phénomène dans leurs travaux. [87]. Des formulations spéciales comportant des additifs permettent d'éviter ce jaunissement. Nous pouvons citer la formulation brevetée par NREL (National Renewable Energy Laboratory) ou encore celle de la société STR.

TPU

Le polyuréthane thermoplastique (TPU) est un encapsulant alternatif à l'EVA. Cet élastomère est le produit d'une réaction entre un oligomère hydroxylé, un diisocyanate et un diiol court [88].

Tout comme l'EVA, celui-ci peut être dégradé lorsqu'il est exposé aux rayons UVs. Pour cette raison, lors de la formulation du TPU, certains additifs sont ajoutés pour éviter ce changement d'aspect [82].

Cet élément a joué un rôle important dans les travaux de lamination réalisés au cours de cette thèse de doctorat.

PVB

Le polyvinyle butyrale (PVB) est utilisé à l'origine pour la fabrication de verres feuilletés pour des vitres de sécurité ou des vitres automobiles.
D'après les analyses effectuées par F. J John Pern du NREL, le PVB ne jaunit pas après 1250 heures d'exposition aux UVs [87].

Si on le compare à l'EVA, cet encapsulant présente l'avantage d'avoir un meilleur comportement au feu, d'être un thermoplastique aisément réutilisable et enfin d'avoir un ratio performance/coût supérieur. De la même manière que l'EVA, celui-ci peut être trouvé sous différentes formulations pour améliorer ses caractéristiques [89].

La cellule

Les cellules que nous voulons laminer sont des cellules en silicium amorphe. Le substrat est en PET, celui-ci est métallisé avant le dépôt des couches p-i-n. Il a été remarqué dans le chapitre 1 suite aux travaux d'Helena Gleskova, I-Chun Cheng, Sigurd Wagner, James C. Sturm, Zhigang Suo que le substrat peut être déformé lorsqu'il est soumis à des températures élevées correspondant aux températures de processus de déposition des différentes couches.

Les méthodes de lamination

Dans sa dernière enquête sur ce sujet datant de Septembre 2009, le magazine Photon recense les différentes technologies de lamination les plus couramment utilisées dans l'industrie :

- ✓ Autoclaves ;
- ✓ Nip Roll ;
- ✓ Lamination sous vide.

D'après cette même enquête, une forte augmentation de l'utilisation des machines de lamination sous vide a été observée au cours de cette année. En effet, celles-ci sont utilisées principalement pour les laminations des modules cristallins et la plupart des modules en couches minces. Les deux autres types de machines sont plutôt utilisés pour laminer des modules couches minces contenant des feuilles PVB.

De plus, la tendance est à l'augmentation de la taille de lamineuse dite à empilement. Ce type de machine permet de laminer plusieurs modules en une seule fois grâce à la superposition de ceux-ci. Le fonctionnement étant le même que celui d'une machine de lamination traditionnelle dite à « niveau unique », l'avantage de ces machines réside dans le gain de place en surface qu'elles entrainent. Leur capacité de travail est ainsi supérieure aux machines simples pour une même surface.

La majorité des compagnies ayant participées à cette étude a révélé avoir amélioré le système de contrôle de température. La maîtrise de ce paramètre permet de réaliser un laminat de bonne qualité.

Machine de lamination « Nip Roll »

Ces machines sont utilisées pour les modules dont le support est en verre. Elles sont à l'origine conçues pour laminer le verre et faire des vitres feuilletées. L'utilisation de cette méthode pour réaliser les modules couches minces est croissante. Ce type de lamination permet aussi de réaliser des modules cristallins.

Description

Le principe de cette technologie de lamination est le passage du laminat entre deux cylindres exerçant une pression. Des fours en entrée et en sortie des cylindres permettent la fusion des films adhésifs sensibles à la température. Les cylindres presseurs ne représentent qu'une partie de la machine. La plupart des machines développées comportent des cylindres convoyeurs, des laveuses, des découpes de verres, des cameras de contrôle de qualité et un autoclave pour la finition.



Figure D : *Machine « Nip-Roll » de marque Billc* [90]

Les différents paramètres

Ce procédé de lamination est dépendant de trois paramètres :

- Pression
- Température
- Vitesse

D'après l'étude réalisée par le magasine Photon, les constructeurs de machines font varier la pression des rouleaux de 100 à 650 N/cm. Quant aux températures maximales, elles varient de 138 °C à 200 °C pour de s écarts maximum de plus ou moins 3° C pour la plupart des constructeurs et plu s ou moins 2, 5°C pour les autres sur une surface laminée. Les vitesses de lamination varient de 10 m/min à 26 m/min selon la machine. Ces machines permettent de laminer des éléments dont la longueur est comprise entre 3 m et 12 m et d'une largeur de 1,5 à 3,2 m.

Machine de lamination autoclave

Utilisés à la base pour fabriquer du verre stratifié ou des composites, les autoclaves sont aujourd'hui employés pour la fabrication de panneaux solaires.
Souvent associés à des machines de lamination « nip-roll» pour « cuire » les modules technologies couches-minces, les autoclaves sont de plus en plus utilisés.

Description

Ces machines sont constituées d'une enceinte dans lesquelles la température et la pression sont contrôlées.



Figure E : *Machine autoclave « Italmatic »* [91]

Les différents paramètres

Les paramètres influents pour réaliser des modules laminés sont:

- ✓ Dimensions du module,
- ✓ Température de lamination,
- ✓ Pression exercée sur les modules.

Le nombre de fabricants d'autoclaves a augmenté en 2009, on en dénombre 3 actuellement.

La société Shangaï Shenke propose un modèle nommé XFGH-2200P. Le volume de cet autoclave est de 15 m3 et a une capacité pondérale de 600 kg.

Deux modèles sont recensés chez Italmatic : AIV 2100×4500 et AIV 3800×7500. Le premier a un volume de 28 m3 et le second 75 m3, leur capacité pondérale est respectivement de 11 500 et 38 000 kg.

Enfin, les modèles Enoclave 2000×4500 et Enoclave 3600×6500 de l'entreprise ASC ont quant à eux une contenance de 28 m3 et 73 m3 et peuvent supporter respectivement un poids de 11 500 et 38 000 kg.

Pour laminer les modules couches minces dont le film thermofusible est en PVB, la température est réglée à 140 °C pour une pression d'air de 14 bars. Le temps estimé varie de 30 à 40 minutes.

Machine de lamination sous vide

Ce type de procédé de lamination est encore le plus utilisé quelle que soit la technologie de cellules photovoltaïques. Les évolutions apportées ont été concentrées sur l'uniformité de la température et le gain de productivité.

Description

Le laminat est placé sur une table, dans une enceinte hermétique dont la partie supérieure est une membrane. Lors de l'exécution du procédé, la membrane épouse la forme du complexe puis le vide est créé dans l'enceinte pour supprimer les bulles d'air. Une augmentation de température permet de fondre les matériaux thermofusibles.

L'avantage de cette technologie réside dans le fait que l'homogénéité de la température et de la pression peut être obtenue plus facilement qu'avec les méthodes précédentes.

Les différents paramètres

Les différents paramètres orientant le choix de la machine sont :

- ✓ Dimensions du module,
- ✓ Température de lamination,
- ✓ Pression exercée.

Les températures maximales que peuvent atteindre les différentes machines sont comprises entre 180 °C et 240 °C. La plupart des co nstructeurs proposent des machines dont la différence de température sur la surface laminée est de plus ou moins 1,5 °C voir 2°C. La tension de vide est infér ieure à 1,5 mBar.

Tableau B : *Caractéristiques de l'ETFE utilisé* [92]

NORTON® ETFE Film — Typical Physical Properties*

Property	ASTM Method	Metric Value	Metric Units	English Value	English Units
General					
Specific Gravity	D-792	1.70-1.76		1.70-1.76	
Yield (1 mil film)		22.5	m^2/kg	110	ft^2/lb
Flammability	UL-94	V-0		V-0	
Water Absorption, 24 hrs		<0.03	%	<0.03	%
Mechanical					
Tensile Strength @ Break	D-882	48	MPa	7000	psi
Elongation @ Break	D-882	300	%	300	%
Tensile Modulus	D-882	965	MPa	140000	psi
Propagating Tear Strength, 1 mil	D-1922	>2.9	N	0.65	lb_f
Electrical					
Dielectric Strength, 1 mil	D-149	215	kV/mm	5500	V/mil
Dielectric Constant, 1 kHz	D-150	2.6		2.6	
Dissipation Factor, 1 kHz	D-150	<0.0008		<0.0008	
Thermal					
Melt Point	D-3418	250-270	°C	482-518	°F
Continuous Service Temperature		165	°C	330	°F
Specific Heat		2000	J/(kg•°K)	0.46	BTU/(lb•°F)
Coefficient of Thermal Conductivity		0.238	W/(m•°K)	1.65	BTU•in/(hr•ft^2•°F)
Limiting Oxygen Index	D-2863	30	%	30	%
Optical					
Refractive Index	D-542	1.40		1.40	

**Represent typical performance properties and should not be used for specification purposes.*

Contact your Saint-Gobain Performance Plastics representative for appropriate values.

Tableau C : *Fiche technique EVA* [93]

etimex

ETIMEX
Primary Packaging GmbH
Martin-Adolff-Str. 44
D-89165 Dietenheim Germany
phone: +49 (0) 7347 67-0

TECHNICAL INFORMATION

ETIMEX® - EVA film VISTASOLAR®
- fast cure, transparent

Code of Material		486.00	Fast Cure	
Properties	**Test method**	**Unit**	**uncured**	**cured**
Density	ISO 1183	g/cm³	0,950	0,960
Tensile strength	ISO 527-3			
MD		N/mm²	6 - 7	20 - 25 *
CD		N/mm²	6 - 7	20 - 25 *
Elongation at break	ISO 527-3			
MD		%	> 1000	500 - 700 *
CD		%	> 1000	500 - 700 *
Secant modulus at 1% elongation		N/mm²	5 - 6	10 - 14 *
Hardness Shore A	DIN 53 505	-	-	68 - 72 *
Thermal Elongation at temperature	DIN 52 328			
< -43 °C (glass transition)		K-1	$1,0 \times 10^{-4}$	$0,9 \times 10^{-4}$
-43 bis -20 °C		K-1	$2,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
-19 bis +10 °C		K-1	$6,0 \times 10^{-4}$	$2,0 \times 10^{-4}$
> 10 °C		K-1	$15,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$
Optical Reflexion (390 - 1105 nm)		%	-	8 - 9
Optical Transmission (390 - 1105 nm)		%	-	91 - 93
UV - Cut - Off		nm	290	360
Refractive Index		-	-	1,479
Range of thickness	DIN 53 370	µm	200 - 1000	
Range of width		mm	400 - 1650	
Core sizes		mm	76 or 152	
Surface finish		-	structured non sticky (one side)	

* These are typical values which may change according to cure conditions.
(Gel content 80 - 90 %)

Replaces Issue: 03.02.03 Dietenheim, 25-08-2005 / QM / Ha

This technical information is intended as a guideline only. Values presented are typical laboratory determinations.

Tests caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques suivantes sont vérifiées avant vieillissement :

- Poids

Une éprouvette de 10 cm² est pesée, pour exprimer le poids de la toile par mètre carré, le résultat obtenu est multiplié par 100.

La norme relative à cet essai est la norme NF G 07 150 [94].

- Mesure de l'épaisseur

L'épaisseur de la toile est mesurée avec un appareil de marque Schmidt. Un comparateur permet de prendre la mesure de la toile. Une pré-charge de 5 cN est placée au dessus de l'appareil pour normaliser la pression de la mesure.

La norme NF EN ISO 5084 [95] est la référence utilisée pour la mesure de l'épaisseur d'une éprouvette textile.

- Résistance mécanique

  - déchirure amorcée

Ce test permet de quantifier la force nécessaire pour déchirer une éprouvette alors que celle-ci a déjà une amorce. Ce test est réalisé sur une machine TEXTEST Instrument FX 3750.

Les éprouvettes sont découpées selon la forme montrée en Figure F. Une coupure est effectuée sur la zone indiquée sur cette même figure. Un pendule oscillateur permet de déchirer l'éprouvette en mesurant la force exercée.

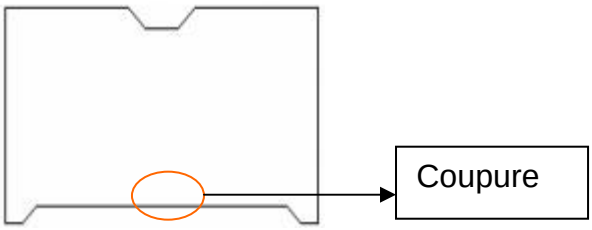


Figure F : *Forme de l'éprouvette utilisée pour la déchirure amorcée*

La norme de référence pour ce test est NF EN ISO 13937-1 [97].

- résistance dynamométrique

Ce test est utile pour qualifier la résistance en traction d'un tissu. Il peut être effectué dans le sens chaîne ou le sens trame.
La résistance à la déchirure amorcée est effectuée sur un dynamomètre de marque Testometrix AX modèle M35 -5 kN. Les éprouvettes mesurent 200 mm et sont placées entre les deux pinces du dynamomètre. Les pinces sont écartées jusqu'à ce que l'éprouvette soit déchirée. La valeur correspondant à la force nécessaire à la destruction de l'éprouvette est relevée. Les valeurs d'allongement sont aussi enregistrées.

La norme NF EN ISO 13937-1 est la norme de référence pour quantifier la résistance à la déchirure des éprouvettes tandis que la norme NF EN ISO 13934-1 permet de connaître l'allongement de ces mêmes éprouvettes.

- Rigidité (ISO 2493) [98]

La mesure de la rigidité est un indicateur de souplesse du tissu. Le tissu ne doit pas être trop rigide pour être roulé et pas trop souple pour permettre sa confection. Les valeurs de rigidité préconisées pour les toiles dépendent de leur gamme et leur application finale.

Le test est réalisé sur un appareil de marque Büchel. Celui-ci est équipé d'un capteur de force. La mesure de rigidité correspond à la force qu'il faut soumettre à une éprouvette textile mesurant 38×70 mm pour la fléchir selon un angle de 15°.

- Schmerber Normal (ISO 811, EN 20811) [99]

Le Schmerber ou colonne d'eau est un test permettant de connaître quelle hauteur d'eau en millimètre pour une section circulaire de 1 cm² peut supporter un textile avant d'être traversé. Ainsi, il est possible de qualifier la perméabilité à l'eau du tissu.

Les tests sont réalisés sur un appareil de marque TEXTEST Instrument FX 3000.
L'échantillon est placé sur sa face exposée aux intempéries au dessus d'un réservoir d'eau. Un joint d'étanchéité permet d'assurer l'imperméabilité entre le tissu et le réservoir d'eau. L'eau dans le réservoir est mise sous pression. Lorsque la troisième goutte traverse le tissu, le test est arrêté et la valeur de pression est relevée.

- Vieillissement Atlas

Pour connaître et quantifier la dégradation des toiles au cours du temps en extérieur, il est possible de simuler un vieillissement dans un appareil. La machine utilisée pour effectuer ces vieillissements est un Atlas Ci 5000.

Le principe est d'exposer des éprouvettes de toile à un rayonnement lumineux, de fortes variations de température et des intempéries simulées.

Le rayonnement lumineux est composé du rayonnement direct, diffus et l'Albédo.
La courbe d'irradiance de la lumière d'exposition en fonction de la longueur d'onde est représentée sur la Figure G.

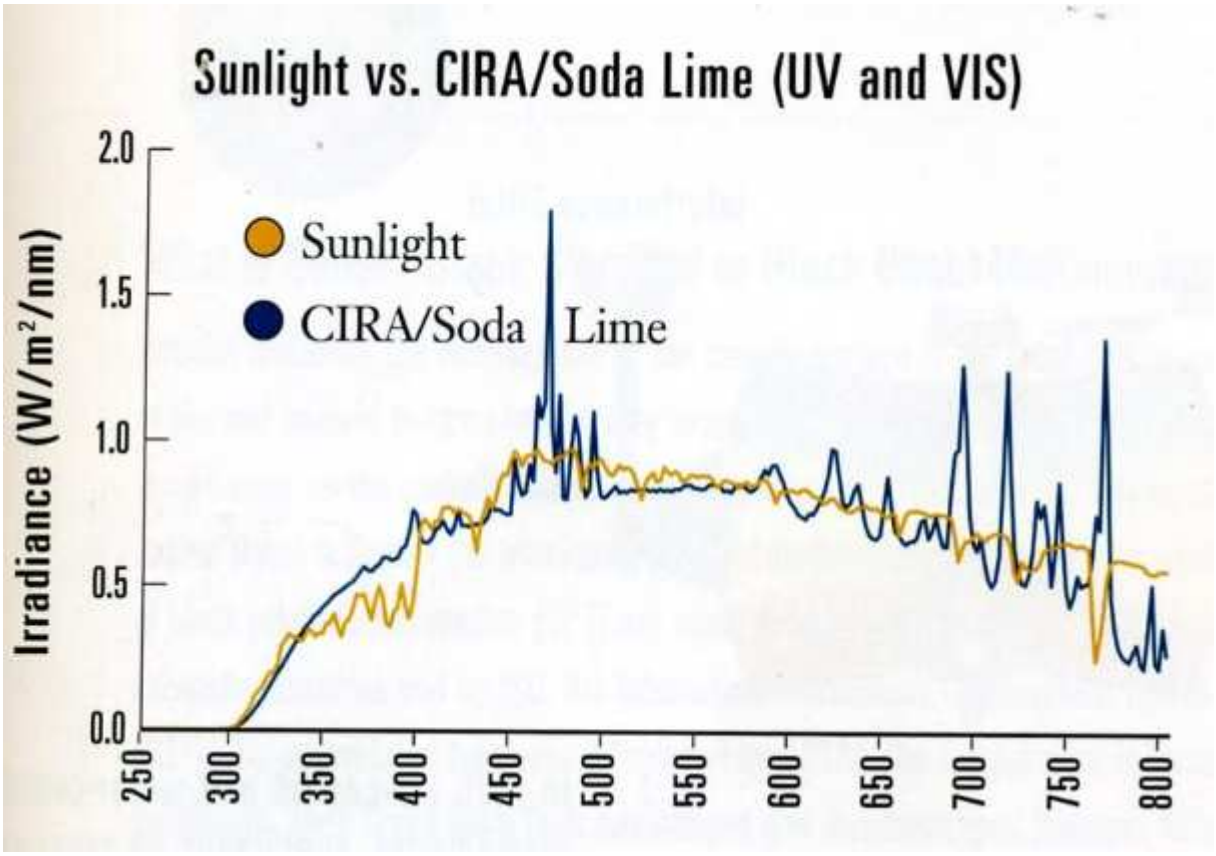


Figure G : *Courbe d'irradiance en fonction de la longueur d'onde*
En Bleu : lumière à laquelle sont exposées les échantillons
En jaune : lumière du soleil [100]

Un cycle de vieillissement dure 1000 heures ce qui correspond à 357 W.h/m² d'énergie reçue par la toile.

Tableau D : *Performances mécaniques d'une toile neutre, sanforisée et laminée*

Toile neutre		Toile Sanforisée		Toile Sanforisée et laminée	
Poids (g/m²)					
314		327		326	
Schmerber (mm)					
1130		610		700	
Rigidité (cN)					
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
1344	872	419	249	597	376
Résistance					
Résistance à la rupture (daN)					
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
141,48	94,68	167,36	103,1	141,3	101,6
Allongement (mm)					
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
25,32	26,16	36,89	25,48	30,6	26,22
Déchirure amorcée (daN)					
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
2,35	1,80	2,64	1,89	2,64	1,89

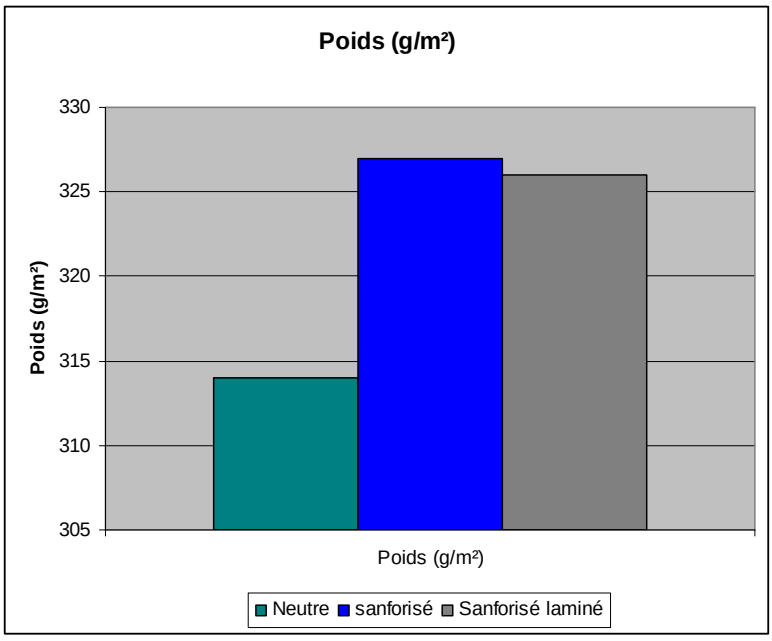


Figure H : *Comparatif du poids (g/m²) des trois types de toile : toile neutre, toile sanforisée et toile sanforisée laminée (valeurs selon le Tableau D ANNEXE)*

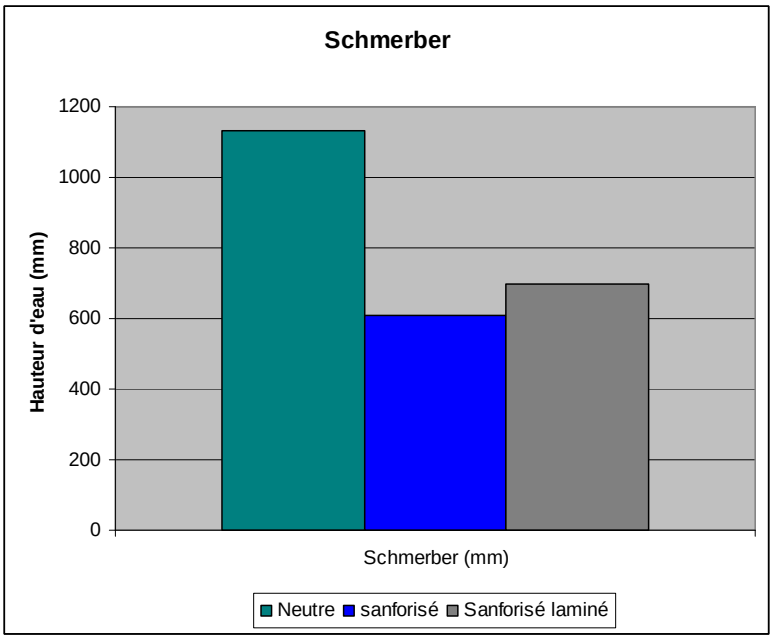


Figure I : *Comparatif du Schmerber (mm) des trois types de toile : toile neutre, toile sanforisée et toile sanforisée laminée (valeurs selon le Tableau D ANNEXE)*

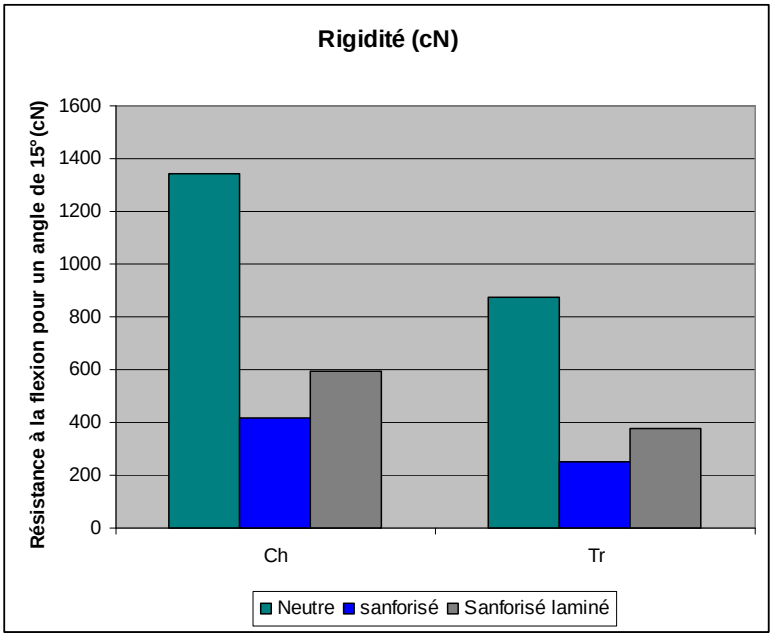


Figure J : *Comparatif de la rigidité (cN) des trois types de toile : toile neutre, toile sanforisée et toile sanforisée laminée (valeurs selon le Tableau D ANNEXE)*

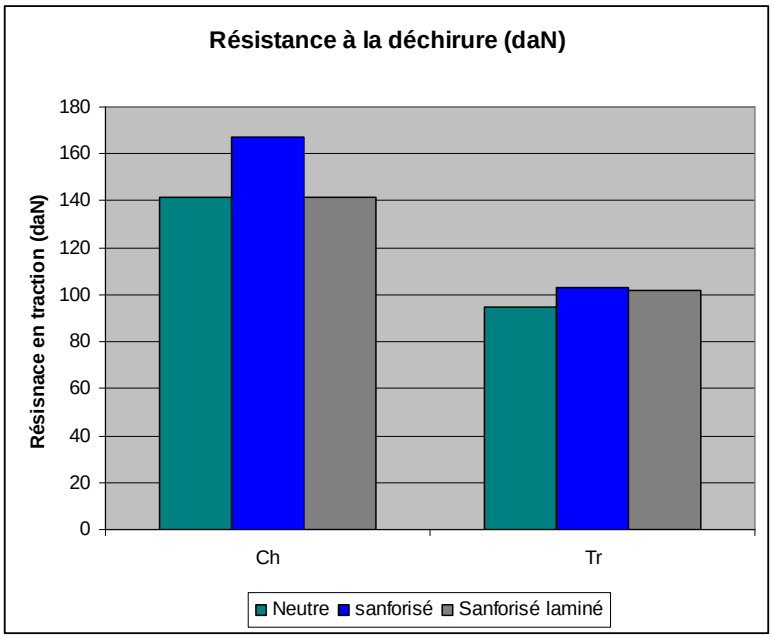


Figure K : *Comparatif de la résistance à la déchirure (cN) des trois types de toile : toile neutre, toile sanforisée et toile sanforisée laminée (valeurs selon le Tableau D* ANNEXE)

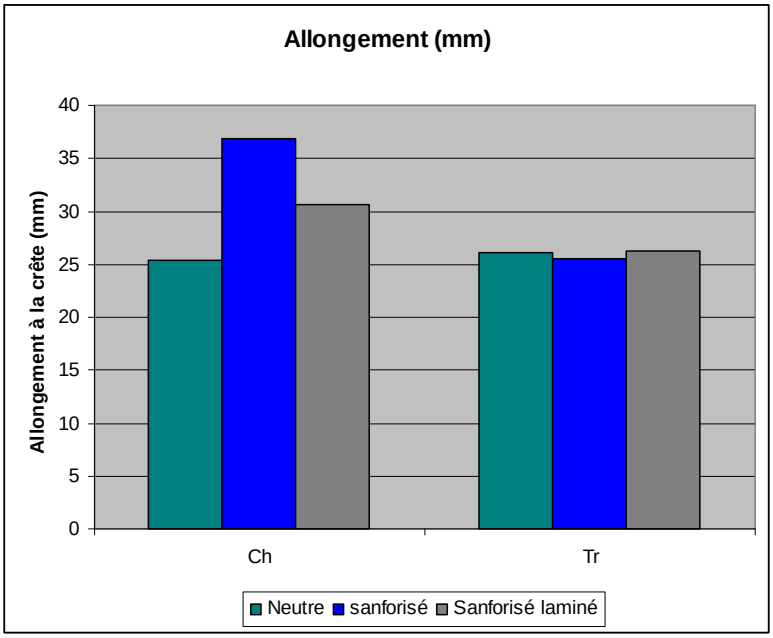


Figure L : *Comparatif de l'allongement à la crête (mm) des trois types de toile : toile neutre, toile sanforisée et toile sanforisée laminée (valeurs selon le Tableau D ANNEXE)*

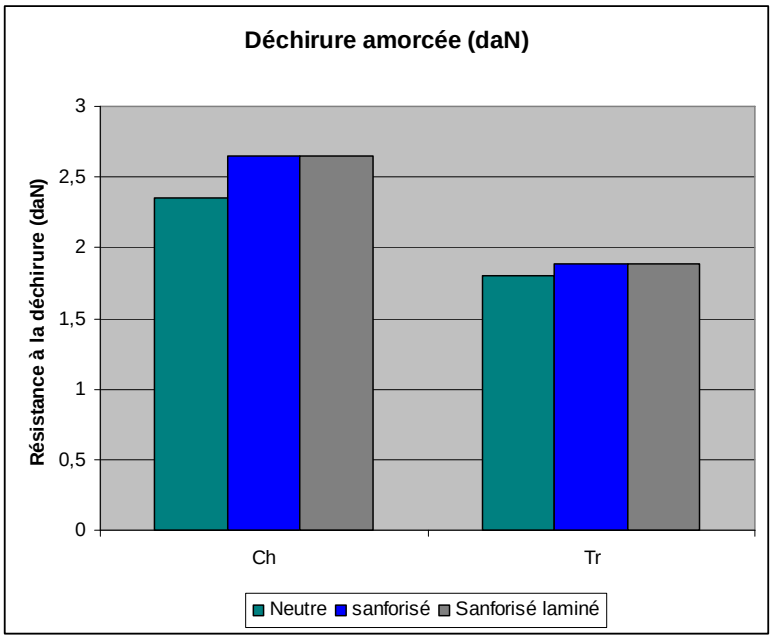


Figure M : *Comparatif de la déchirure amorcée (daN) des trois types de toile : toile neutre, toile sanforisée et toile sanforisée laminée selon le Tableau D*

Developmental Product

Data Sheet

BEMIS
One Bemis Way
Shirley, MA 01464
Tel: 978.425.6761
Toll free: 800.543.1324 (USA)
Fax: 978.425.2278
www.bemisworldwide.com

Adhesives, Coatings, Specialty Films & Seam Tape

Submitted by: Chris K. **Date: 5/15/08** **Version: 1**

PRODUCT **D-6370**

INTENDED APPLICATION
D-6370 is a thermoplastic adhesive film suitable for bonding or encapsulating a variety of substrates used in the construction of PhotoVoltaic Modules.

PRODUCT BENEFITS
- Excellent bonds to PET, Glass, Metal and EVA
- Fast activation/press cycles for higher production rates than crosslinking films
- UV Stable
- Long Shelf Life
- No special storage requirements
- Reheated to recycle module
- Film can be processed in vacuum press or continuous lamination

COMPOSITION
Thermoplastic polyolefin film

PHYSICAL PROPERTIES

• Color:	Clear
• Weight:	23.25g/m² per mil
• Substrate:	Release Paper; Customer Substrate
• Gauge:	102µm, 152 µm,204µm, 254µm
• Hardness	63 Shore A
• % Light Transmission	91%
• Ultimate Tensile Strength[1]	1.9 lbf
• Elongation at Break[1]	400%
• UV Stability[2]	Yellow Index (200hrs@15KWH/m²) = 0.60 per ASTM E313-96

THERMAL PROPERTIES

• Softening Point:	88°C	
• Melt Flow Index:	5 dg/min	Condition: 190°C / 2.16 Kg Load

APPLICATION CONDITIONS

• Glue Line Temperature[2]:	120°C to 155°C	
• Recommended Bonding Conditions[3]:	Vacuum Press	Roll to Roll Lamination
Machine Setting	• 135°C to 165°C	• 150°C to 200°C
Dwell Time/ Speed	• Pump = 5 min, Press = 3 min	• 3 m/min
Pressure	• 15 psi	• 60 psi

NOTICE: Seller hereby excludes any express warranties and the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. The following is made in lieu of any such warranties. Bemis Associates, Inc. believes the information and specifications supplied are reliable, but does not guarantee that any results shown or claimed will be obtained. Before using, the user shall determine the suitability and fitness of the product for its intended use. The user assumes all risks and liability whatever in connection with its own tests and use. Neither seller nor manufacturer shall be liable for any injury, loss or damage, direct or consequential, arising out of the use, misuse or inability to use the product.

Figure N : *Fiche technique TPU*

Tableau E : *Comparaison des propriétés des tissus laminés par PowerFilm Solar®.*

Laminé													
Masse Surfacique (g/m²)													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus						Echantillons neutres					
50×50		Lé 1		Lé 2		Lé 3		Neutre 1		Neutre 2		Neutre 3	
311		313		327		314		312		314		312	
								312,67					
Schmerber (mm)													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus						Echantillons neutres					
50×50		Lé 1		Lé 2		Lé 3		Neutre 1		Neutre 2		Neutre 3	
950		1100		550		1130		1080		1130		1180	
(goutte à 715)								1130,00					
Rigidité (mN)													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus						Echantillons neutres					
50×50		Lé 1		Lé 2		Lé 3		Neutre 1		Neutre 2		Neutre 3	
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
1322	823	1339	678	848	659	1032	716	1481	761	1344	872	1324	937
								1383			856,67		
Résistance													
Résistance à la rupture (N)													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus						Neutre					
		Lé 1		Lé 2		Lé 3		Neutre 1		Neutre 2		Neutre 3	
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
1263,95	904,5165	1461	847,1	1347	893,3	1429	899,4	1354	859,2	1415	946,9	1383	881,2735
								1384,044			895,79		
Allongement (%)													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus						Neutre					
		Ech lisses		Ech lisses		Ech lisses		Neutre 1		Neutre 2		Neutre 3	
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
21,282	23,75	23,86	22,45	26,1	22,87	23,51	23,29	23,35	25,54	25,33	26,17	24,42	25,693
								24,37			25,80		
Déchirure amorcée (daN))													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus						Neutre					
		Lé 1		Lé 2		Lé 3		Neutre 1		Neutre 2		Neutre 3	
Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr	Ch	Tr
2,19	1,47	2,19	1,73	2,59	1,99	2,35	1,71	2,235	1,515	2,355	1,805	2,315	1,73
								2,30			1,68		
Ecarts coloris (cmc)													
Echantillons laminés continus		Echantillons laminés semi-continus									Echantillons neutres		
50×50		Lé 1			Lé 2			Lé 3			1	2	3
		0,08			1,23			0,13			0,07	0,09	0,07

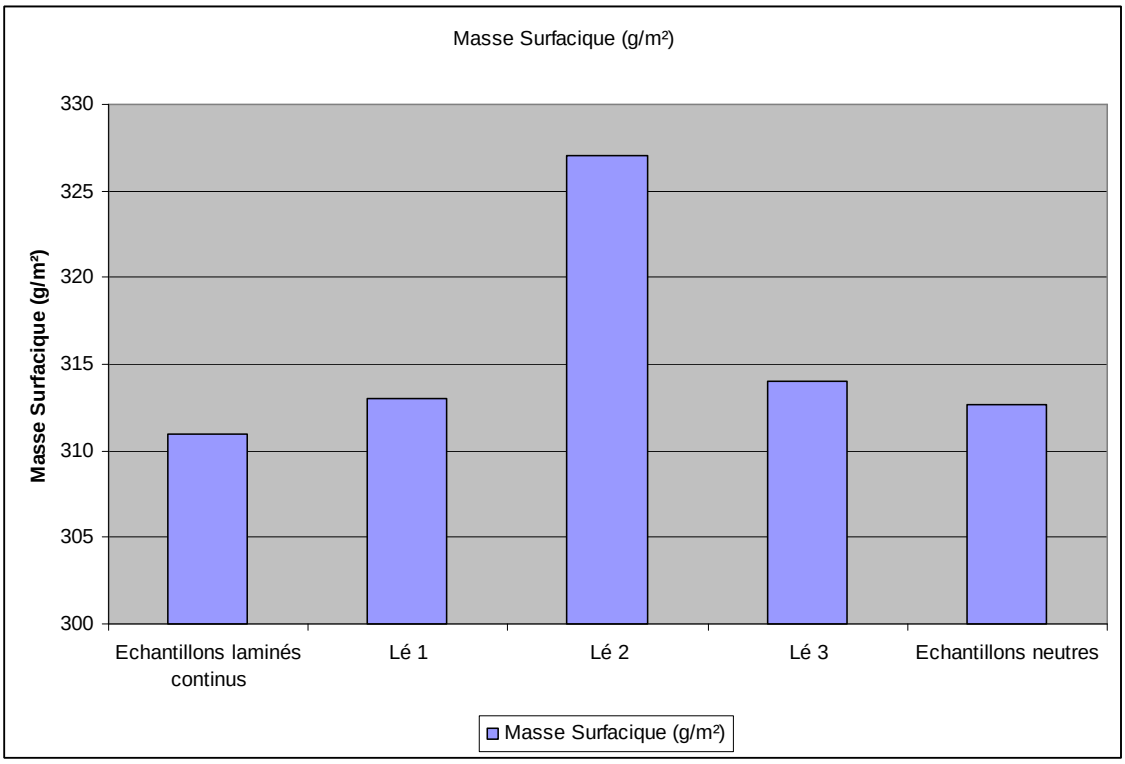


Figure O : *Masse surfacique se rapportant au Tableau F*

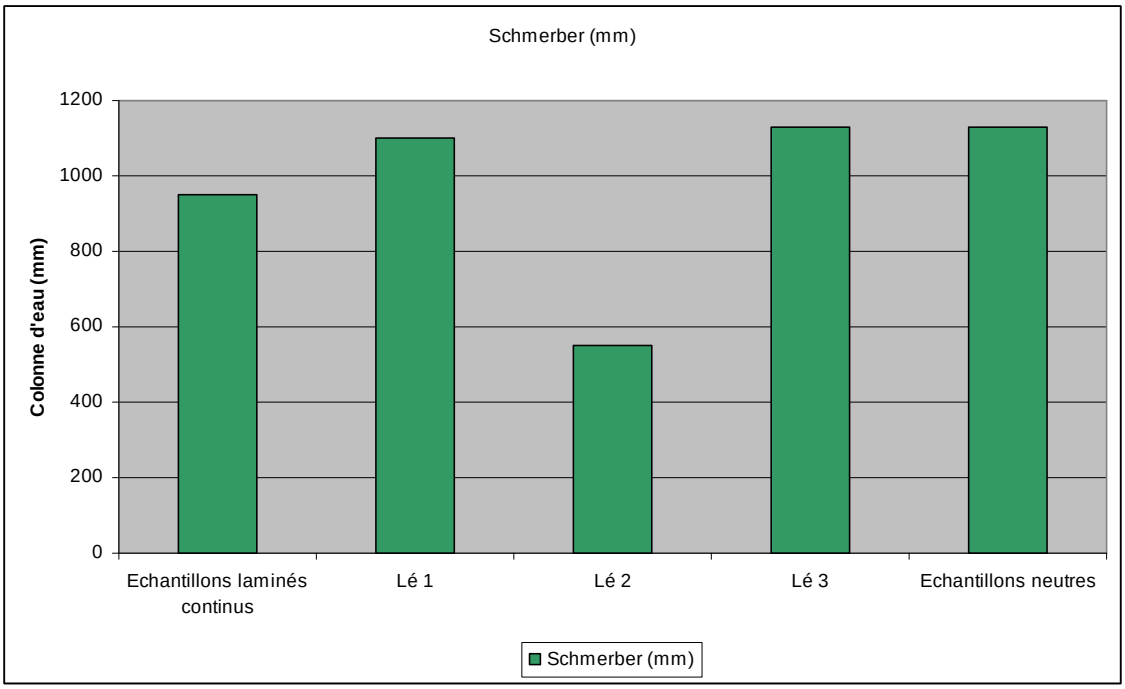


Figure P : *Schmerber se rapportant au Tableau F*

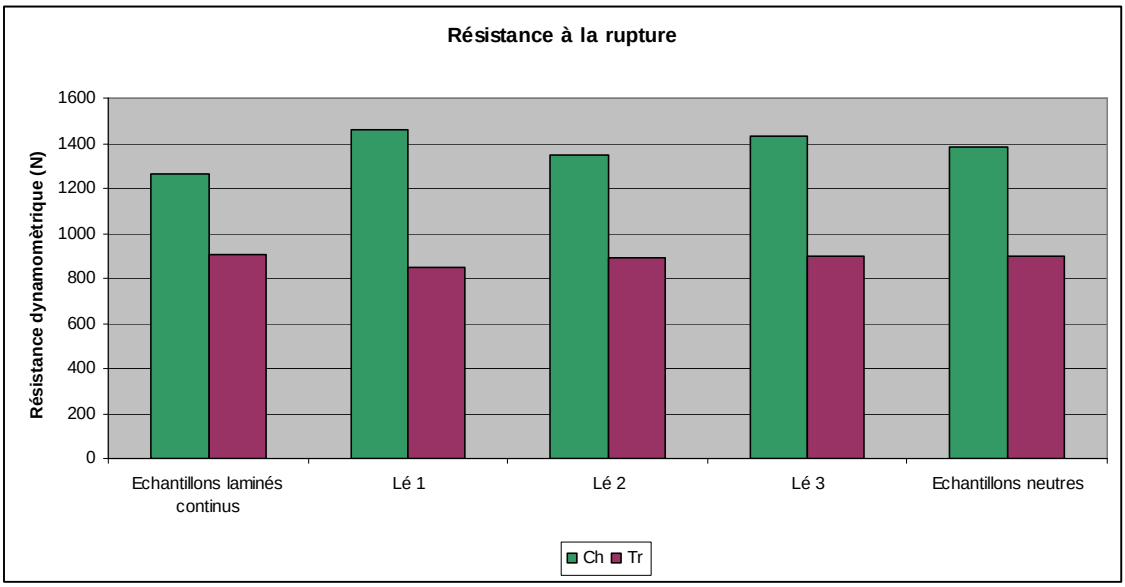


Figure Q : *Résistance à la rupture se rapportant au Tableau F*

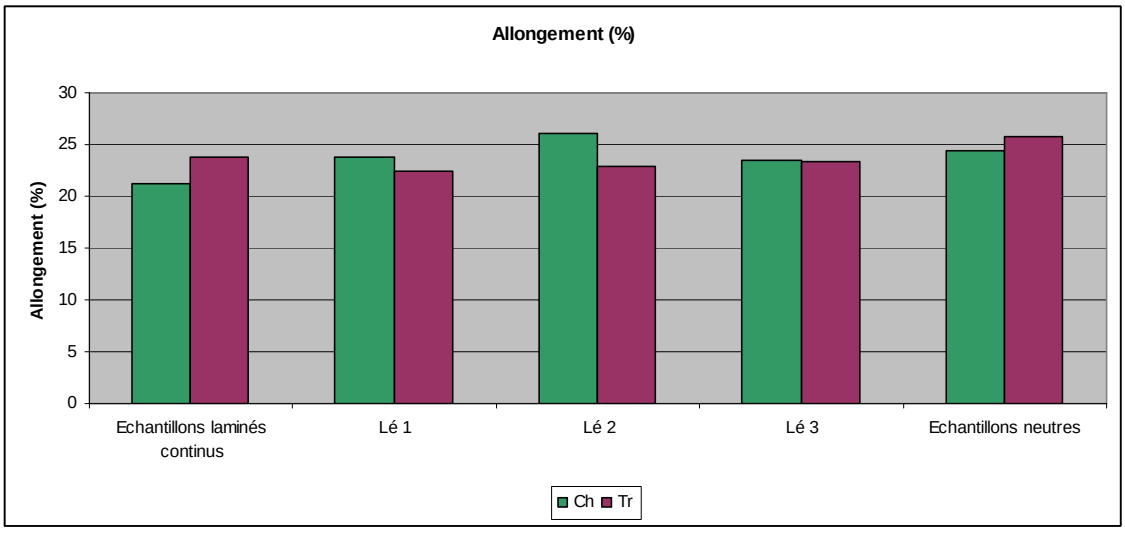


Figure R : *Allongement se rapportant au Tableau F*

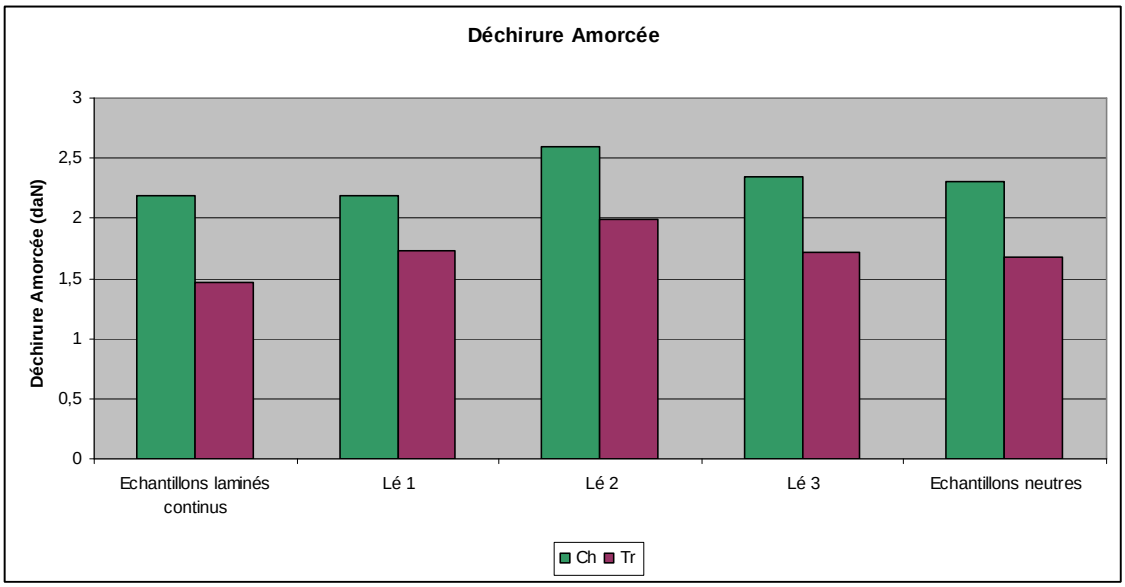


Figure S : *Déchirure amorcée se rapportant au Tableau F*

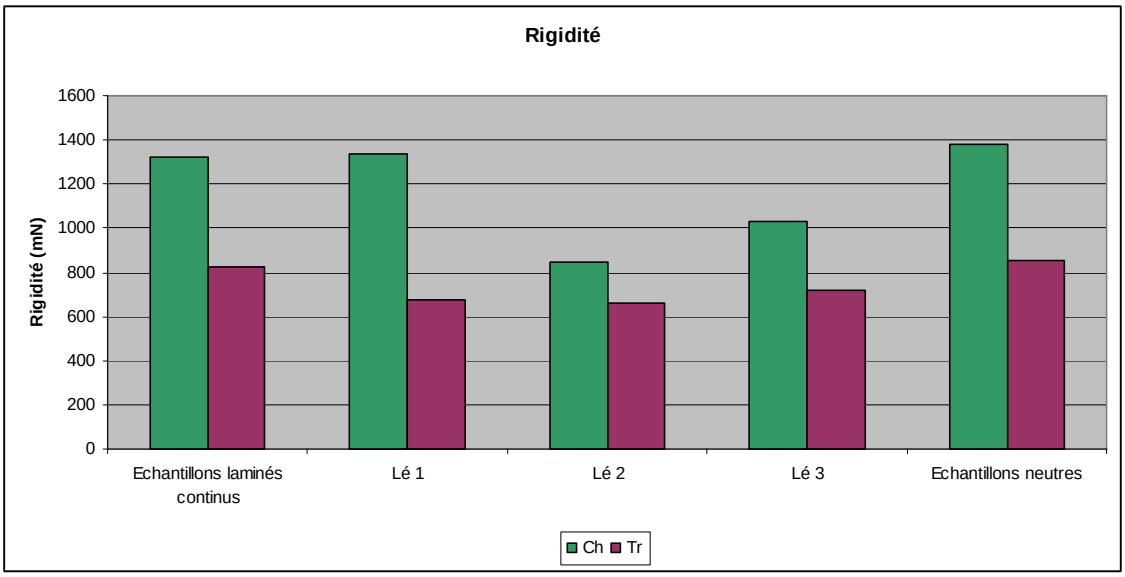


Figure T : *Rigidité se rapportant au Tableau F*

Tableau F : *Mesures des déformations sur le lé 1*

lé 1		Description: *(Laminé en continu ; plissé à droite) Unité: mm*						
		Mesures / Fil Gauche		Mesures / Fil Droit		Limite Bord Droit / Fil gauche		Largeur Toile
Point Mesure	Longueur Mesurée	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	
0	0	57		9		1261		1204
1	200	60		10,5		1259,5		1199,5
2	400	61		10,5		1259,5		1198,5
3	600	61	121	11	75	1259	1195	1198
4	800	61	122	11	73	1259	1197	1198
5	1000	61	125	11	73	1259	1197	1198
6	1200	61	126	11	70	1259	1200	1198
7	1400	60	129	13	69	1257	1201	1197
8	1600	58	130	14	66	1256	1204	1198
9	1800	57	131,5	15	65	1255	1205	1198
10	2000	55	133	16,5	62	1253,5	1208	1198,5
11	2200	53,5	135,5	18,5	60	1251,5	1210	1198
12	2400	51	137	21,5	59	1248,5	1211	1197,5
13	2600	50	140	24	57	1246	1213	1196
14	2800	46	141	26,5	55	1243,5	1215	1197,5
15	3000	41		29		1241		1200
16	3200	39		32		1238		1199
Moyenne		54,85	130,92	16,71	65,33	1253,29	1204,67	1198,44
Ecart-type		7,17	6,66	7,29	6,76	7,29	6,76	1,69
Coefficient Variation		13,07	5,09	43,66	10,35	0,58	0,56	0,14

Tableau G : *Mesures des déformations sur le lé 1*

lé 1			
Point Mesure		Δ Déformation	
		Gauche	Droite
0	0-200	3	-1,5
1	200-400	1	0
2	400-600	0	-0,5
3	600-800	0	0
4	800-1000	0	0
5	1000-1200	0	0
6	1200-1400	-1	-2
7	1400-1600	-2	-1
8	1600-1800	-1	-1
9	1800-2000	-2	-1,5
10	2000-2200	-1,5	-2
11	2200-2400	-2,5	-3
12	2400-2600	-1	-2,5
13	2600-2800	-4	-2,5

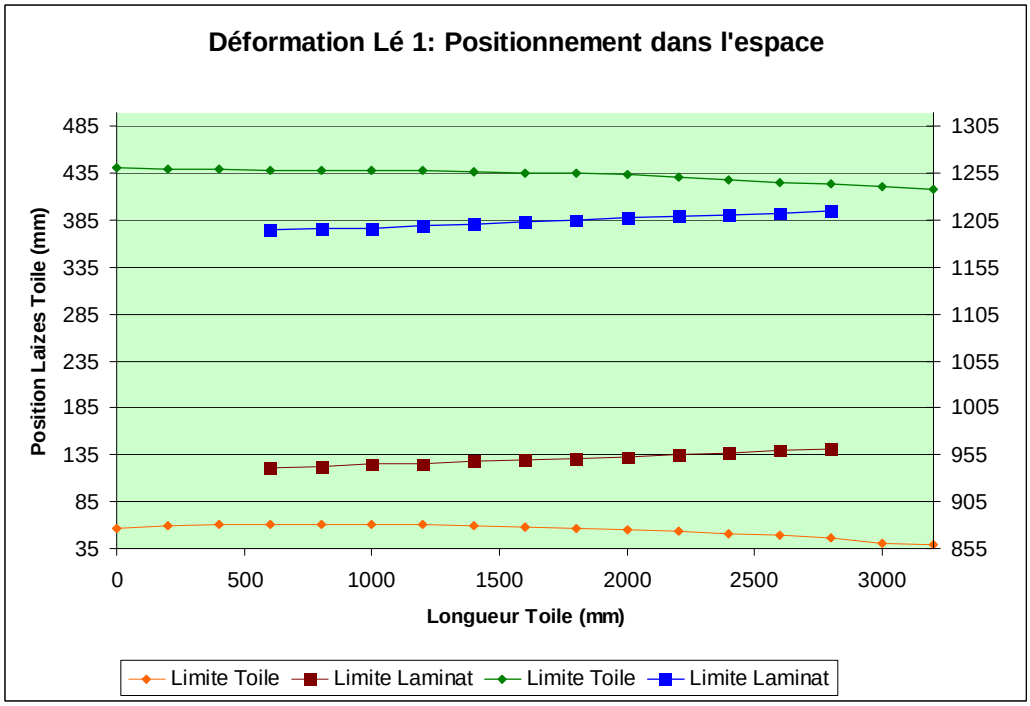


Figure U : *Représentation déformation du lé 1 selon les valeurs Tableau G*

Tableau H : *Mesures des déformations sur le lé 2*

lé 2		Description: *(Laminé en continu ; non plissé) Unité : mm*						
		Mesures / Fil Gauche		Mesures / Fil Droit		Limite Bord Droit / Fil gauche		Largeur Toile
Point Mesure	Longueur Mesurée	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	
0	0	6		65		1205		1199
1	200	10		63		1207		1197
2	400	12		61		1209		1197
3	600	14		59		1211		1197
4	800	17		57		1213		1196
5	1000	19		55,5		1214,5		1195,5
6	1200	21		54		1216		1195
7	1400	22		51		1219		1197
8	1600	21	75	48	91	1222	1179	1201
9	1800	22	76	47,5	92	1222,5	1178	1200,5
10	2000	23	76	46,5	91,5	1223,5	1178,5	1200,5
11	2200	23	77	45	90	1225	1180	1202
12	2400	23,5	77	44,5	88,5	1225,5	1181,5	1202
13	2600	23,5	77	44,5	88	1225,5	1182	1202
14	2800	23,5	79	46,5	89,5	1223,5	1180,5	1200
15	3000	23		47,5		1222,5		1199,5
16	3200	22		49,5		1220,5		1198,5
Moyenne		19,15	76,71	52,06	90,07	1217,94	1179,93	1198,79
Ecart-type		5,43	1,25	6,83	1,51	6,83	1,51	2,37
Coefficient Variation		28,35	1,63	13,12	1,68	0,56	0,13	0,20

Tableau I : *Mesures des déformations sur le lé 2*

lé 2			
Point Mesure		Δ Déformation	
		Gauche	Droite
0	0-200	4	2
1	200-400	2	2
2	400-600	2	2
3	600-800	3	2
4	800-1000	2	1,5
5	1000-1200	2	1,5
6	1200-1400	1	3
7	1400-1600	-1	3
8	1600-1800	1	0,5
9	1800-2000	1	1
10	2000-2200	0	1,5
11	2200-2400	0,5	0,5
12	2400-2600	0	0
13	2600-2800	0	-2
14	2800-3000	-0,5	-1
15	3000-3200	-1	-2

Tableau J : *Mesures des déformations sur le lé 3*

lé 3		Description : *(Laminé sous table) Unité : mm*						
		Mesures / Fil Gauche		Mesures / Fil Droit		Limite Bord Droit / Fil gauche		Largeur Toile
Point Mesure	Longueur Mesurée	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	
0	0	36		33		1237		1201
1	200	36		35		1235		1199
2	400	36		35		1235		1199
3	600	36		35		1235		1199
4	800	35		35		1235		1200
5	1000	35		35		1235		1200
6	1200	35		35		1235		1200
7	1400	35		36		1234		1199
8	1600	34		36		1234		1200
9	1800	34		36		1234		1200
10	2000	33	74	36	112	1234	1158	1201
11	2200	35	74	36	112	1234	1158	1199
12	2400	35	74	36	112	1234	1158	1199
13	2600	35	74	36	111	1234	1159	1199
14	2800	35	73	35	110	1235	1160	1200
15	3000	35		33,5		1236,5		1201,5
16	3200	36		33,5		1236,5		1200,5
Moyenne		35,06	73,80	35,12	111,40	1234,88	1158,60	1199,82
Ecart-type		0,83	0,45	0,98	0,89	0,98	0,89	0,83
Coefficient variation		2,36	0,61	2,78	0,80	0,08	0,08	0,07

Tableau K : *Mesures des déformations sur le lé 3*

lé 3			
Point Mesure		Δ Déformation	
		Gauche	Droite
0	0-200	0	-2
1	200-400	0	0
2	400-600	0	0
3	600-800	-1	0
4	800-1000	0	0
5	1000-1200	0	0
6	1200-1400	0	-1
7	1400-1600	-1	0

Tableau L : *Mesures des déformations sur le lé 4.*

lé 4		Description : ***Laminat sans plis, mauvaise adhérence. Roadtrek. Unité : mm***						
		Mesures / Fil Gauche		Mesures / Fil Droit		Limite Bord Droit / Fil gauche		Largeur Toile
Point Mesure	Longueur Mesurée	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	
0	0	36	89	33	78,5	1237	1191,5	1201
1	200	38,5	91,5	30,5	76,5	1239,5	1193,5	1201
2	400	40	93,5	28	74	1242	1196	1202
3	600	42	96	25,5	72	1244,5	1198	1202,5
4	800	43,5	98	23,5	69	1246,5	1201	1203
5	1000	44	99	24,5	67,5	1245,5	1202,5	1201,5
6	1200	44,5	101	25	66	1245	1204	1200,5
7	1400	45		26,5		1243,5		1198,5
8	1600	44		27		1243		1199
Moyenne		41,94	95,43	27,06	71,93	1242,94	1198,07	1201,00
Ecart-type		3,12	4,31	3,05	4,69	3,05	4,69	1,50
Coefficient Variation		7,43	4,51	11,26	6,51	0,25	0,39	0,12

Tableau M : *Mesures des déformations sur le lé 4*

lé 4			
Point Mesure		Δ Déformation	
		Gauche	Droite
0	0-200	2,5	2,5
1	200-400	1,5	2,5
2	400-600	2	2,5
3	600-800	1,5	2
4	800-1000	0,5	-1
5	1000-1200	0,5	-0,5
6	1200-1400	0,5	-1,5
7	1400-1600	-1	-0,5

Tableau N : *Mesures des déformations sur le lé 5*

lé 5		Description: (Laminé en continu ; plissé à droite) Unité: mm						
		Mesures / Fil Gauche		Mesures / Fil Droit		Limite Bord Droit / Fil gauche		Largeur Toile
Point Mesure	Longueur Mesurée	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	Limite Toile	Limite Laminat	
0	0	38,5		34		1236		1197,5
1	200	40	97	33	101,5	1237	1168,5	1197
2	400	40	100	33	101,5	1237	1168,5	1197
3	600	40	101	32,5	100	1237,5	1170	1197,5
4	800	38	101	33	99,5	1237	1170,5	1199
5	1000	38	101,5	34,5	99,5	1235,5	1170,5	1197,5
6	1200	37,5	99,5	35	100,5	1235	1169,5	1197,5
7	1400	35,5		37		1233		1197,5
8	1600	34		40,5		1229,5		1195,5
Moyenne		37,94	100,00	34,72	100,42	1235,28	1169,58	1197,33
Ecart-type		2,08	1,64	2,58	0,92	2,58	0,92	0,90
Coefficient Variation		5,49	1,64	7,42	0,91	0,21	0,08	0,08

Tableau O : *Mesures des déformations sur le lé 5*

lé 5			
Point Mesure		Δ Déformation	
		Gauche	Droite
0	0-200	1,5	1
1	200-400	0	0
2	400-600	0	0,5
3	600-800	-2	-0,5
4	800-1000	0	-1,5
5	1000-1200	-0,5	-0,5
6	1200-1400	-2	-2
7	1400-1600	-1,5	-3,5

Tableau P : *Mesures des variations des largeurs des lés*

		Dimension des lés (cm)				
Graduation	Longueur (cm)	Lé1	Lé 2	Lé 3	Lé 4	Lé 5
0	0	117,75	119,95	119,95	119,9	117,7
1	20	117,5	119,9	120,1	120,05	117,8
2	40	117,1	119,7	119,75	119,75	117,6
3	60	117,5	119,75	119,85	120	117,6
4	80	117,5	119,75	119,9	120,15	117,65
5	100	117,45	119,65	119,95	120,1	117,6
6	120	117,45	119,85	120,05	120,1	117,6
7	140	117,5	119,9	119,9	120	117,45
8	160	117,8	119,8	119,85	119,95	117,5
9	180	117,8	120	120,35	120,05	117,65
10	200	117,75	119,9	120,15	120,05	117,7
11	220	117,75	119,9	120,5	120,35	117,8
12	240	117,65	119,65	120,3	120,2	117,7
13	260	117,7	119,9	120,1	120,05	117,7
14	280	117,7	119,9	120,25	120,15	117,65
15	300	117,65	119,9	120,15	120,05	117,55
16	320	117,7	119,95	120,25	120,05	117,6
17	340	117,85	120	120,55	120,4	117,55
18	360	117,85	119,9	119,95	119,75	117,5
19	380	117,95	120,05	119,4	119,5	117,4
20	400	117,9	119,85	120	119,85	117,55
Moyenne		117,70	119,89	120,09	120,09	117,60
Ecart-type		0,15	0,09	0,27	0,17	0,10
Coefficient Variation		0,13	0,08	0,23	0,14	0,09

Tableau Q : *Mesures des variations de dimension des raccords de toile et ourlets sur le store*

		Raccords & Ourlets (cm)					
Graduation	Longueur (cm)	Ourlet 1 (cm)	Raccord 1 (cm)	Raccord 2 (cm)	Raccord 3 (cm)	Raccord 4 (cm)	Ourlet 2 (cm)
0	0	2,25	2,6	2,5	2,5	2,5	2,3
1	20	2,5	2,6	2,4	2,6	2,75	2,2
2	40	2,9	2,15	2,25	2,2	2,45	2,4
3	60	2,5	2,45	2,25	2,4	2,6	2,4
4	80	2,5	2,45	2,25	2,55	2,65	2,35
5	100	2,55	2,4	2,25	2,6	2,6	2,4
6	120	2,55	2,45	2,45	2,65	2,7	2,4
7	140	2,5	2,5	2,45	2,55	2,6	2,55
8	160	2,2	2,55	2,5	2,45	2,55	2,5
9	180	2,2	2,7	2,85	2,9	2,6	2,35
10	200	2,25	2,45	2,4	2,4	2,6	2,3
11	220	2,25	2,15	2,2	2,75	2,8	2,2
12	240	2,35	1,95	1,85	2,55	2,7	2,3
13	260	2,3	2,1	2,1	2,4	2,65	2,3
14	280	2,3	2,15	2,05	2,55	2,7	2,35
15	300	2,35	2,3	2,05	2,6	2,55	2,45
16	320	2,3	2,45	2,3	2,75	2,5	2,4
17	340	2,15	2,55	2,6	3,1	2,45	2,45
18	360	2,15	2,55	2,45	2,6	2,45	2,5
19	380	2,05	2,75	2,65	2,25	2,4	2,6
20	400	2,1	2,7	2,45	2,9	2,5	2,45
Moyenne		2,34	2,43	2,35	2,58	2,59	2,39
Ecart-type		0,20	0,22	0,23	0,21	0,11	0,10
Coefficient Variation		8,46	8,97	9,77	8,29	4,20	4,34

Tableau R : *Mesures des déformations store confectionné*

Store Test		**Description:**			
		Mesures / Fil Gauche	Mesures / Fil Droit	Limite Bord Droit / Fil gauche	Largeur Toile
Point Mesure	Longueur Mesurée	Limite Toile	Limite Toile	Limite Toile	
0	0	0	0	5855	5855
1	200	0	-3	5852	5852
2	400	1	-6	5849	5850
3	600	0	-8	5847	5847
4	800	-2	-11	5844	5842
5	1000	-4	-14	5841	5837
6	1200	-5	-16	5839	5834
7	1400	-6	-19	5836	5830
8	1600	-7	-20	5835	5828
9	1800	-9	-19	5836	5827
10	2000	-11	-20	5835	5824
11	2200	-13	-20	5835	5822
12	2400	-14	-21	5834	5820
13	2600	-14	-20	5835	5821
14	2800	-14	-20	5835	5821
15	3000	-14	-20	5835	5821
16	3200	-13	-19	5836	5823
17	3400	-12	-18	5837	5825
18	3600	-10	-19	5836	5826
19	3800	-8	-18	5837	5829
20	4000	-6	-16	5839	5833
21	4200	0	-15	5840	5840
Moyenne		-7,32	-15,55	5839,45	5832,14
Ecart-type		5,44	6,09	6,09	11,05
Coefficient de variation		-74,29	-39,19	0,10	0,19

Tableau S : *Caractéristiques techniques du 50 TT avant et après lamination*

Caractéristiques techniques du 50 TT avant et après lamination																	
échantillons		**T (°C)**	**v (m/min)**	**laize (cm)**	**épaisseur (mm)**	**masse (g)**	**schmerber (mm d'eau)**	**rigidité**		**déchirure (daN)**		**dynamo (daN)**		**vapeur (%)**		**lavage (%)**	
								ch	tr	ch	tr	ch	tr	ch	tr	ch	tr
22816A023	A	0	0	120,2	0,61	316	1160	1205	695	2,1	1,47	123,6	91,7	0	0,2	-1	0
	1	150	0,3	120	0,61	316	1083	1160	747	2,28	1,61	115,8	86,8	0,1	0,1	-0,7	0
	2	150	0,4	120	0,61	316	1170	1238	712	2,33	1,56	142,9	96,1	0	0	-0,8	0
	3	150	0,6	120,1	0,61	313	1100	1243	745	2,34	1,65	130,7	91,9	0,1	0,1	-0,4	0
	4	170	0,3	120	0,6	318	1033	1280	703	2,35	1,68	123,1	87,1	-0,1	0	-0,6	0
	5	170	0,4	120	0,61	317	1103	1277	727	2,19	1,62	135,2	82,8	0,1	0,1	-0,7	-0,1
	6	170	0,6	120	0,61	317	1083	1270	733	2,43	1,59	133,4	91,3	0,1	0,1	-0,4	0
22815A023	B	0	0	120	0,61	316	1160	1205	695	2,1	1,51	128,8	91,1	0	0,1	-0,6	0
	7	180	0,3	119,9	0,6	318	1003	1297	703	2,26	1,53	134,5	89,7	0	0	-0,5	0,1
	8	180	0,4	119,9	0,6	317	1073	1317	798	2,26	1,56	127,2	92,9	-0,1	-0,1	-0,6	0,1
	9	180	0,6	119,9	0,61	314	1050	1270	783	2,27	1,56	133,8	89,8	-0,1	0	-0,7	0,1

Observations annexes :

- A la suite de ces essais de paramètres, nous avons fait un passage de toile en rajoutant un rouleau de calandre classique au cas où il serait nécessaire de fournir une pression en plus bien que ponctuelle.
  La pression de la calandre était réglée à 2,5 bars, la température à 180℃ et la vitesse à 0,6 m/min.
  L'échantillon obtenu n'a pas nécessité de test car il est clairement inexploitable. Il a subi un important retrait et s'est donc plissé sur toute la laize.

- Une tentative de lamination a été faite avec le TPU pris entre deux pièces de toile.
  A 150℃ et 0,6 m/min l'accroche n'était pas satisfa isante par contre à 180℃ et 0,3 m/min le résultat est satisfaisant et plutôt encourageant.

Suite à ces tests, des préformes contenant des cellules PowerFilm Solar ont été laminées sur du tissu acrylique 50 TT et la nouvelle gamme Orchestra Max. Bien que les tests concernant la nouvelle gamme Orchestra Max ne soient pas apparents dans ce rapport, ceux-ci n'ont pas montré de différences avec le tissu 50 TT.

Tests de matières

Les tests matière ont été réalisés en plusieurs étapes :

- Tests d'accroche entre deux pièces de tissu (face textile) :

  - avec du TPU (Etimex)
  - avec de l'EVA (Etimex)
  - avec de l'EVA (Flexcell)

Toute cette partie est faite à la fois sur 50TT et sur Orchestra Max afin de déceler une éventuelle différence concernant leur adhérence.

Le TPU Etimex n'a pas été qualifié selon la méthode DSC. En effet, son épaisseur importante nous interdit son utilisation définitive. Réaliser des laminations de faible épaisseur avec un TPU dont la finesse est importante semble très difficile. Ceci est démontré au cours des essais. Dans l'attente de recevoir un TPU de marque Bemis ou d'une autre matière l'utilisation du TPU Etimex pour tester les paramètres de la lamination nous a semblé être la meilleure alternative.

- ✓ Recherche des paramètres machines (accroche et esthétisme) :
- ✓ Lamination d'une superposition d'EVA / ETFE et TPU / ETFE,
- ✓ Lamination des échantillons Power Film sans cellules,
- ✓ Lamination des échantillons Konarka avec cellule,
- ✓ Lamination des préformes Flexcell 35 x 35.

Les paramètres principaux sont la vitesse et la température. La pression des vérins réglant la tension du tapis n'étant pas la pression exercée sur le laminat, il est difficile de constater l'effet du réglage sur la pression réelle.

La pression est constante tout au long du test. Sa valeur dans les vérins est de 7 bars.

Il s'agit de la pression de fonctionnement habituelle de la machine et de la pression constante maximale que l'on puisse obtenir. Une fois les autres paramètres définis, la diminution de la pression du tapis est tentée. Toutefois, à cause de la souplesse excessive du tapis pour une valeur de pression diminuée cela ne semble donc pas nécessaire.
Il s'agit de tests de lamination de deux pièces de tissu soudées avec les différentes matières mises en jeu soient l'EVA Flexcell 0,2 et 0,5 mm, l'EVA Etimex 0,5 mm et du TPU Etimex 0,5 mm.

Tableau T : *Délamination sur Orchestra Max (kN)*

épaisseur (mm)		**0,2**		**0,5**		**0,5**		**0,5**	
température (°C)	**vitesse (m/s)**	**charge (N) sur EVA Flexcell**				**charge (N) sur EVA Etimex**		**charge (N) sur TPU Etimex**	
		moy	crête	moy	crête	moy	crête	moy	crête
150	0,3	134,4	158,7	149	170,2	176,9	255,8	64,6	88,9
	0,4	131,2	146,7	127,8	143,8	156,3	210,8	110,3	129,1
	0,6	123,6	140,3	109,2	127,6	148,8	193,3	116	148,2
	0,8					142,9	178,1	114	147,6
	1			93,5	108	139,3	168,7	19,9	81,3
	1,5					117,5	142,8	0	0
	2					85,1	103,1	0	0

Tableau U : *Délamination sur 50 TT (kN)*

épaisseur (mm)		**0,2**		**0,5**		**0,5**		**0,5**	
température (°C)	**Vitesse (m/s)**	**charge (N) sur EVA Flexcell**				**charge (N) sur EVA Etimex**		**charge (N) sur TPU Etimex**	
		moy	crête	moy	crête	moy	crête	moy	crête
150	0,3	186,8	205,8	218,6	244,1	243,5	299,6	106,3	148,1
	0,4			231,3	257,3	268,5	297,8	84,1	192,4
	0,6	181,3	190,8	197,6	219	255,9	285,3	28	61,8
	0,8					251,2	280	35,5	90,7
	1	181	191,5	219,1	259,3	249	270,3	9,9	57,6
	1,5	173,3	190,9	197,1	214,4	245,6	269,6	4,7	38,4
	2			159,9	200,6	225,4	252,8	0	0
170	1			267,3	308,2	264,2	335,1	140,2	180,2
	1,5			240	283,7	244,9	281,7	121,7	168,6
	1,8					236	280,3	131,8	170,2
	2	190,3	205,6	219,5	250,4	205,3	276,6	103,7	151,9

- Toutes les valeurs sont élevées à l'exception de celles obtenues avec le TPU pour T ≤ 150°C et V ≥ 0,6 m/min.

- On obtient des accroches nettement supérieures avec l'EVA par rapport au TPU quelque soit le type de tissu.
- L'adhérence est tout à fait régulière tout au long de la délamination avec l'EVA.
- A l'inverse avec le TPU, on observe un pic très élevé en début de lamination puis une stabilisation.
- L'EVA accroche mieux sur le 5O TT alors que le TPU accroche mieux sur l'Orchestra Max.
- Toutes les vitesses n'ont pas été testées avec l'EVA fourni par Flexcell par manque de matière mais il est néanmoins possible de le comparer à l'EVA acheté chez Etimex.
  On observe une évolution des valeurs parallèles pour les deux EVA de même épaisseur (0,5 mm) et des niveaux de délamination similaires à 170 °C et une cinquantaine de Newton inférieur pour Flexcell à 150 °C. Il est possible que cette différence soit simplement due au vieillissement de l'EVA de Flexcell qui a été stocké environ deux ans.
- On observe bien entendu une accroche inférieure avec l'EVA plus fin (0,2 mm) mais l'ordre de grandeur reste le même et le résultat très satisfaisant.
  On peut donc imaginer que les 0,5 mm ne sont pas nécessaires pour laminer et que 0,2 mm sont amplement suffisants voire même 0,1 mm car il s'agit ici d'une accroche de deux éléments textiles et il faut donc remplir les aspérités du tissu.

Observation importante

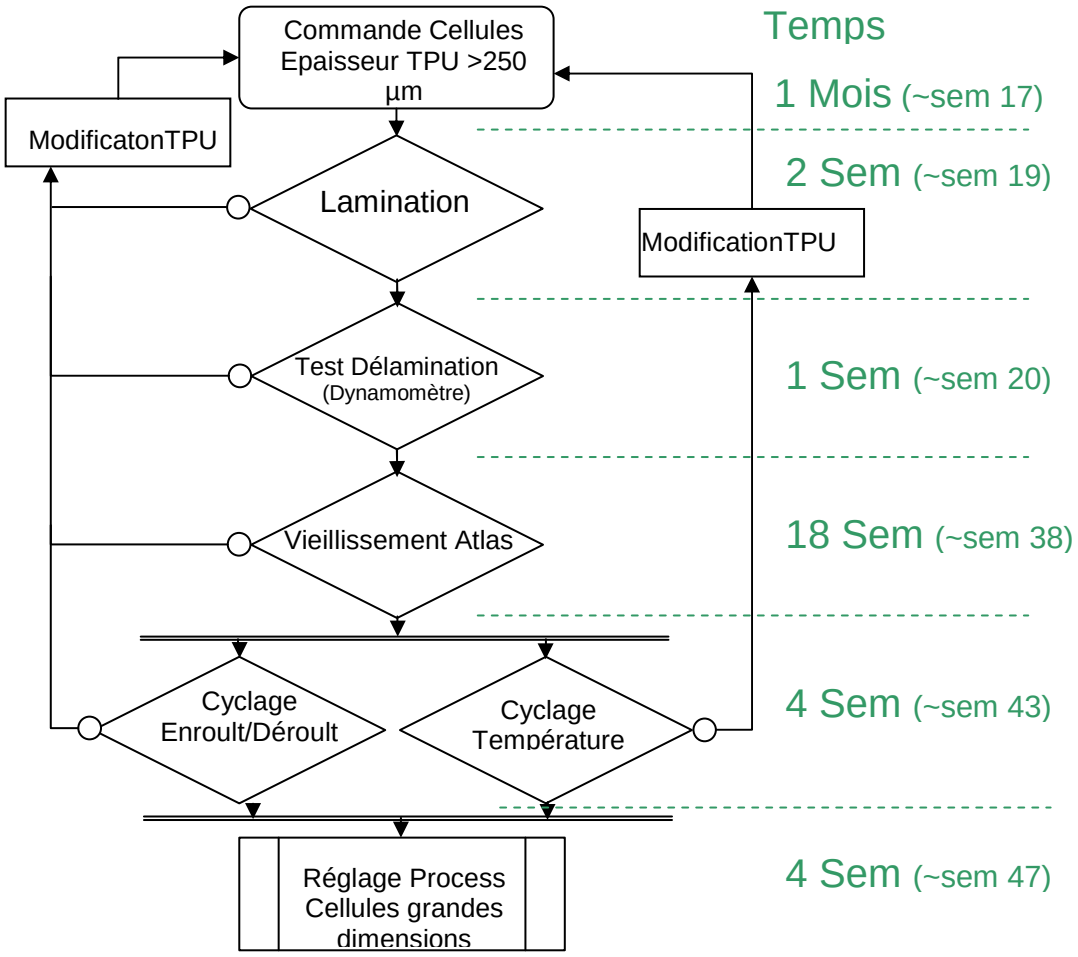
Certes on obtient des résultats supérieurs avec un EVA plus épais, mais l'EVA 0,2 chauffe plus vite, de ce fait les résultats varient peu dans la fourchette de vitesse testée et l'on peut se permettre d'augmenter la vitesse sans détériorer l'accroche.

Il reste à savoir si l'on peut obtenir une accroche similaire et suffisante sur l'ETFE traité C2S et si le même parallèle peut être fait entre le TPU 0,5 mm et le TPU 0,1 ou 0,2 mm.

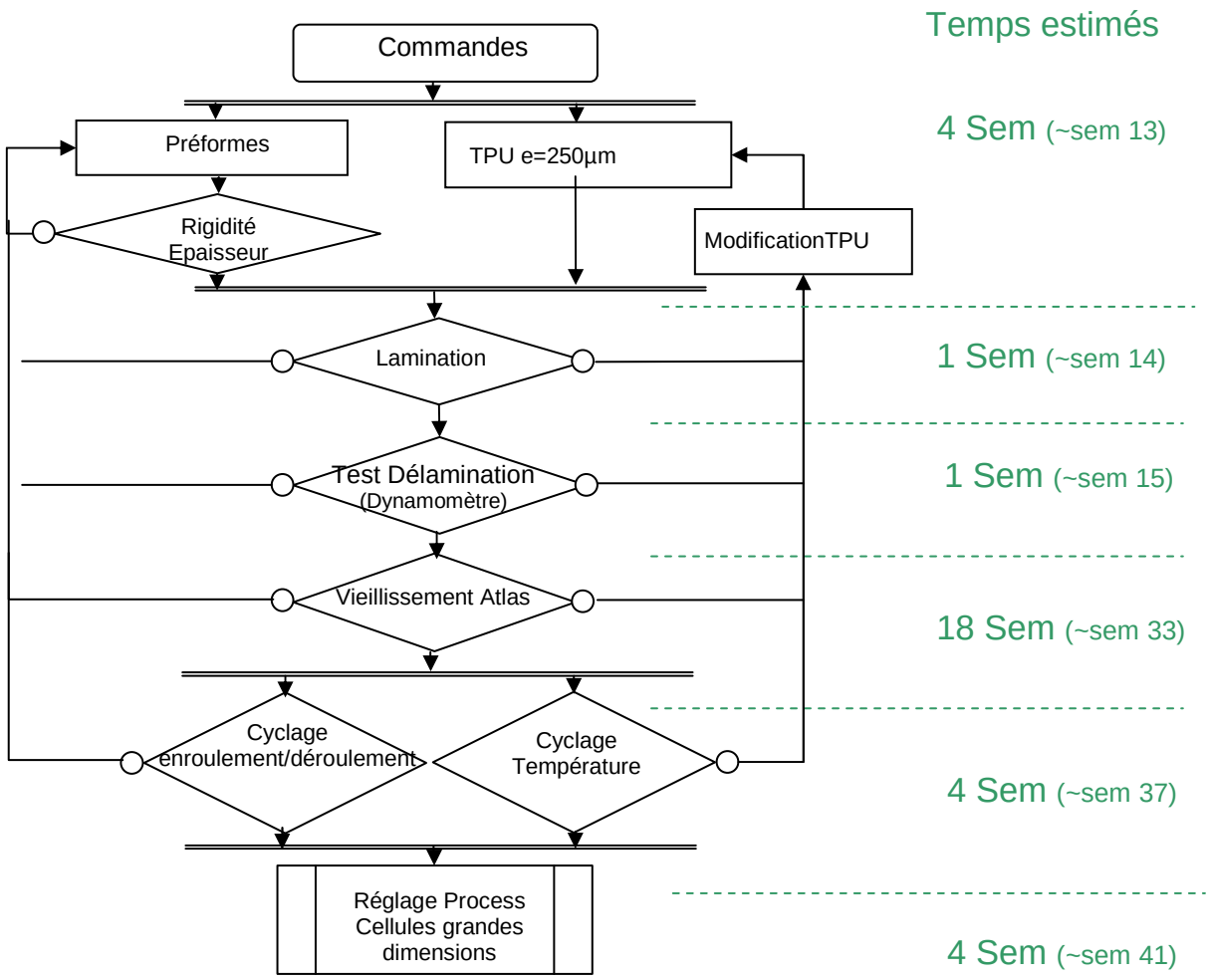
Les tests préliminaires étant faits, la méthode de lamination doit maintenant être déterminée.

Pour ce faire, il est idéal de rappeler que nous travaillons avec trois fournisseurs : Flexcell, PowerFilm Solar et Konarka. Les deux premiers sont susceptibles de fournir une technologie déjà au point. Quant au troisième, le manque de durabilité dans le temps de sa cellule nous empêche de le considérer comme un fournisseur potentiel à court terme.

Tous les tests réalisés pour déterminer les paramètres et la composition de la préforme laminée idéale sont faits suivant les Logigramme 1 et Logigramme 2.



Logigramme 1 : *Validation épaisseur TPU Powerfilm Solar®*



Logigramme 2 : *Validation préformes Flexcell® et film adhésif cellules/tissu.*

Afin de tenter de trouver le matériau et son procédé de lamination le plus adapté, un cahier des charges concernant l'adhésif a été établi. Chacune des contraintes le caractérisant y est décrite.

Contraintes

Conditionnement et disposition

L'adhésif doit être facilement manipulable et conditionné en rouleau si possible.
L'adhésif doit pouvoir être déposé à froid ou à chaud (si dépose à chaud, la température ne doit pas excéder 165°C).

Dimensions de l'adhésif

Epaisseur

L'adhésif doit être le plus fin possible pour éviter d'avoir une épaisseur finale trop élevée. Idéalement, cette épaisseur ne doit pas dépasser les 200 µm.

Longueur

Continue si possible

Laize

La laize de l'adhésif doit être de 115 cm minimum.

Une fois déposé, séché ou réticulé, l'adhésif doit permettre une adhérence entre l'ETFE (ou l'EVA cas échéant) et le tissu en moyenne d'au moins 150 N pour une largeur de 5 cm.

Une fois déposé, séché ou réticulé, l'adhésif doit permettre une adhérence entre l'ETFE (ou l'EVA cas échéant) et le tissu en moyenne d'au moins 150 N pour une largeur de 5 cm.

Durée de vie

Idéalement, l'adhésif doit être permanent, sinon, il doit avoir une durée de vie d'au moins 10 ans en extérieur. Il ne doit pas subir de dégradation esthétique ni technique (adhérence) avec les différents éléments extérieurs (ci-dessous) et lors de son utilisation :

- ✓ Température ;
- ✓ Humidité ;
- ✓ Rayonnements UV ;
- ✓ Roulement-déroulement du tissu.

Les contraintes de tests seront les suivantes :

- ✓ Exposition aux UVs et intempéries selon la norme ISO 105 B04.

- ✓ 5000 cycles : d'enroulements et déroulements.

Déterminer l'aptitude d'un module à supporter les effets dus à la succession des conditions de température élevée et d'humidité suivie de séjour à la température au-dessous de zéro. Ce n'est pas un essai de choc thermique.

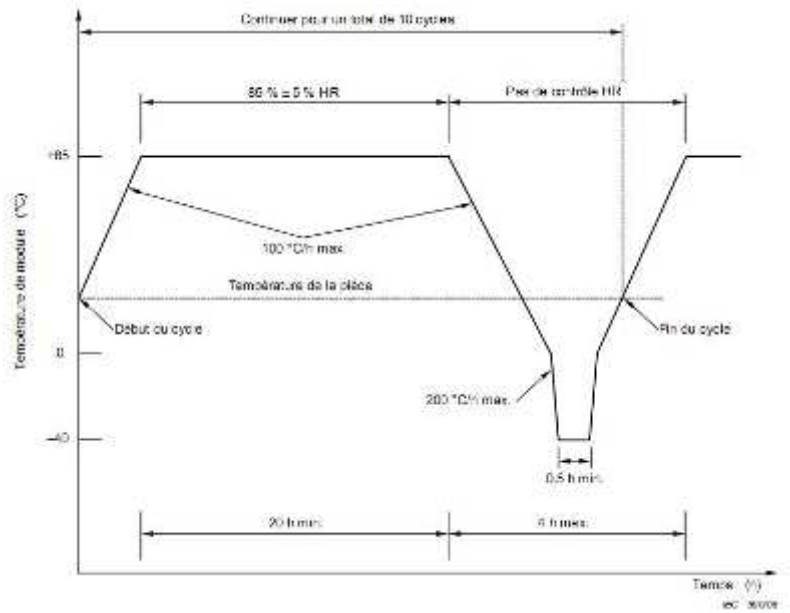


Figure V : *Cycle de vieillissement en température selon la norme IEC 61646* [26]

Suite à la définition du cahier des charges, nous avons décidé de diviser l'étude en deux parties distinctes :

- Adhésifs sensibles à la pression ;
- Adhésifs thermoplastiques.

Test d'adhérence des matières thermoplastiques

La possibilité d'utiliser plusieurs fournisseurs de cellules photovoltaïques nous oblige à travailler chaque matière indépendamment. Il faut cependant trouver des corrélations entre les différents essais pour améliorer l'adhérence et l'esthétisme de ces matières et voir l'impact de changement de paramètres.

Choix de la matière et définition du complexe à laminer

Les matières sensibles à la pression

D'autres matériaux alternatifs à l'EVA et au TPU ont été testés. Des adhésifs sensibles à la pression de deux marques différentes ont été testés. Ces matériaux sont composés de colles acryliques.

- ✓ Adésia ;
- ✓ Adetec.

Adésia

Adhérence ETFE / Orchestra Max avec ADESIA 400

Les conditions d'application optimales décrites par le fournisseur sont une température inférieure à 80 °C et un temps de sécha ge de 24h. La température

ambiante peut suffire mais une certaine chaleur améliore l'adhérence tant qu'elle n'est pas destructrice à partir de 80 °C.
Quelques essais à température ambiante ont été réalisés mais, tout comme à température plus élevée, ils restent moins concluants qu'aux alentours de 70 °C.

Les résultats obtenus dans la lamineuse sont les suivants :

Tableau V : *Adhérence Adesia 400 / ETFE*

Adhérence Adesia 400 / ETFE					
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**commentaires (mots)**	**charge (N) moyenne**	**crête**
160	3	0	une épaisseur sur une face	14,3	16,6
70	0,3	2	une épaisseur sur une face	18,9	25,6
	0,7	2	une épaisseur sur une face	20,7	26
			une épaisseur sur une face / cellule dessus	17,8	20,9
			une épaisseur sur une face + préchauffe cell	18,1	22,7
		3	une épaisseur sur une face	20	24,6
	0,7	2	deux épaisseurs sur une face	32,3	41,8
			deux épaisseurs sur deux faces + préchauffe cell	35,8	40,9
			trois épaisseurs sur une face	36,2	45,8
			trois épaisseurs sur une face (2nd délamin)	*29,7*	*37*
			huit épaisseurs sur une face	30	57,6
			huit épaisseurs sur une face (2nd délamin)	*37,5*	*52,7*
			une épaisseur sur une face + tissu lavé	20,8	25,9
			trois épaisseurs sur une face + tissu lavé	37	43,5

L'épaisseur de l'adhésif est négligeable, l'aspect est régulier et la couleur est homogène. Par contre l'adhérence dans la configuration de base est assez faible, environ 20 N.

En faisant varier les paramètres ou en changeant la manière de déposer l'adhésif, on n'observe pas ou peu d'améliorations. Le seul point vraiment influant est le nombre de couches d'adhésif utilisées, dans la limite de trois, qui nous permet de nous rapprocher de 40 N. Il semble s'agir de la limite du produit car il reste accroché des deux côtés et la délamination se fait dans l'épaisseur de la matière adhésive.

Il est à noter qu'une fois l'échantillon délaminé, si on le replace en exerçant une pression manuelle on obtient plus ou moins l'adhérence initiale.
Cela signifie que si l'on constate un début de délamination sur une cellule, on peut aisément la recoller en retrouvant l'accroche de base.

Un autre avantage de ce type de produit réside dans la facilité de manipulation.
En effet, on peut facilement retirer un film protecteur pour déposer l'adhésif sur la cellule, découper ce qui dépasse, retirer le second film protecteur et déposer avec précision le tout sur le tissu. On obtient alors un ensemble qui a déjà une bonne cohésion, et peu importe l'orientation du tissu pour entrer dans la machine, la cellule

restera à sa place et n'aura donc nullement besoin d'être maintenue par un quelconque dispositif.

L'adhérence obtenue reste assez faible, nous testerons quand même son évolution dans le temps.

Adhérence EVA / Orchestra Max avec ADESIA 400

La tenue dans le temps du traitement Corona sur l'ETFE n'étant pas maitrisée et étant donné les propriétés naturelles anti-adhérentes de cette matière, il est intéressant de tester l'accroche directement sur l'EVA.

Tableau W : *Adhérence Adesia 400 / EVA*

Adhérence Adesia 400 / EVA						
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**		**commentaires (mots)**	**charge (N)**	
					moyenne	**crête**
70	0,4	3		une épaisseur sur une face + préchauffe cellule	5,8	7,7
	0,7	2		trois épaisseurs sur une face	9,8	12,8
				trois épaisseurs sur une face + préchauffe cellule	14	21,2

Les résultats sont clairement inférieurs sur l'EVA par rapport à l'ETFE.

Quelques échantillons de lamination avec l'ETFE sont en vieillissement dans l'ATLAS pour nous permettre d'observer l'évolution de l'adhérence dans le temps.
Cette solution comporte certains avantages et bien qu'en deçà des forces d'adhérence escomptées, on peut lui trouver un intérêt si aucune faiblesse n'est observée avec le temps.

Adhetec

Adhérence ETFE / Orchestra Max avec Adhetec

Il s'agit du même genre d'adhésif qu'Adesia mais avec une armure.

La température de pose recommandée se situe entre 18 et 25 °C, nous partirons sur 30 car il sera difficile d'atteindre 25 °C sur la m achine en été.
Il faut 24 h pour le séchage et il est annoncé que la réticulation continue ensuite aux UVs.

Une première série d'essais nous donne les résultats suivants :

Tableau X : *Adhérence Adhetec*

Adhérence Adhetec					
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**commentaires (mots)**	**charge (N) moyenne**	**crête**
70	1	1		46,8	52,6
			tissu lavé	41,2	48
50	1	1		41,4	45,5
30	1	1		39	45,4
		2		40,7	47,1
		0		35,1	42,1
		ø		11,2	16,3
		1	sans tapis	28,3	35,4
			tissu lavé	39,6	45,9
			tissu lavé sans tapis	40,9	51
			2 épaisseurs	44,7	51,7
			un passage adhésif + tissu puis un passage avec la cellule	41,4	46,2
	0,3	1		43,7	50,8
		ø		16,9	25,9
		1	sans tapis	41	47,5
		2	tissu lavé	37,1	47,4

En tout premier lieu, on constate que contrairement aux recommandations du fournisseur, c'est à 70 °C que nous obtenons les me illeurs résultats.
Ensuite, la présence de la calandre améliore considérablement les résultats et une vitesse lente semble préférable.
Comme pour Adesia, on obtient une meilleure accroche en multipliant les épaisseurs mais la différence est moins spectaculaire.

Au vu des résultats, il semble nécessaire de compléter le test avec plus de valeurs pour des températures supérieures ou égales à 70 °C .

Tableau Y : *Adhérence Adhetec (complément)*

Adhérence Adhetec (complément)					
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**calandre (bar)**	**commentaires (mots)**	**charge (N) moyenne**	**crête**
70	1	1		45,2	54,4
	0,3	1		49,5	60,6
		2		47,8	58
		4		48,8	61,9
100	1	1		43,9	55,3
	0,3	1	sans tapis	48,2	61,8
		2		46,3	55,3
		2		42,9	57,6
		4		48,6	59,1
		6		45,9	59,8
120	1	1		46,2	57
	0,3	1		47,5	56,8
		2		44,7	58
		4		46,4	57,7
		4	deux épaisseurs sur une face	45,5	55,3
150	1	1		46,9	53,9
	0,3	1		50,5	62,5
		4		48,1	58,2

L'ensemble des résultats nous montre qu'on peut difficilement espérer une charge moyenne supérieure à 50 N.
La pression de la calandre est bien nécessaire mais il ne semble pas utile d'aller au-delà de 1 bar et au contraire, car les résultats se détériorent légèrement.
La température ne semble pas être un facteur primordial.
Tous les résultats à 0,3 m/min ou 1 m/min et 1 bar sur la calandre, quelque soit la température sont tous compris entre 40 et 50 N.

En conclusion, comme pour Adesia il sera difficile d'obtenir plus de 50 N d'adhérence. Quelques échantillons sont en vieillissement dans l'Atlas mais il reste préférable de viser une adhérence de base un peu plus haute.

Les adhésifs thermoplastiques

Test de lamination EVA / ETFE et TPU / ETFE

Travaux préliminaires

Pour tester l'adhérence des différentes matières, il a tout d'abord été décidé de travailler sur de l'ETFE de marque Saint-Gobain et de modèle Norton. Le film d'ETFE utilisé a une épaisseur de 100 µm et a subi un traitement plasma corona sur l'une de ses faces pour améliorer son accroche.

Ce type de test permet aussi d'appréhender la lamination de 3 couches indépendantes.
Aucun résultat satisfaisant en termes d'aspect n'a été obtenu. La présence systématique de bulles d'air a été observée :

- ✓ d'innombrables petites bulles formant un fond blanchâtre et paraissant se situer en profondeur de la matière,
- ✓ des grosses bulles en surface,
- ✓ des plis de l'ETFE,
- ✓ une association de tous ces défauts…

Il n'est pas possible de réaliser les tests d'adhérence avec le dynamomètre. En effet, dès que l'on obtient un minimum d'accroche, l'ETFE étant très fin, il se déforme, s'étire voire se rompt au lieu de se délaminer. L'adhérence est qualifiée verbalement en les estimant manuellement.

Les essais TPU (Etimex) / ETFE ne fournissent aucun résultats intéressants en termes d'accroche mais leurs aspects semblent moins « bullés » qu'avec l'EVA.

Tableau Z : *Adhérence Tissu / EVA (Etimex) / ETFE*

Tissu / EVA (Etimex) / ETFE				
température (°C)	**vitesse (m/min)**	**ETFE (mm)**	**adhérence**	**aspect**
135	0,3	0,05 0,1	bonne	des grosses bulles en surface
150	0,3	0,05 0,1	très bonne	quelques grosses bulles, plein de petites énormément de bulles
150	0,6	0,05 0,1	bonne faible	des bulles moyennes
150	1	0,05 0,1	très bonne bonne	des grosses bulles et peu de petites des grosses bulles et pas de petites
2 passages en machine				
110 / 150	0,3	0,05 0,1	très bonne bonne	des grosses bulles, plein de petites et des plis idem mais moins de grosses bulles

- La lamination simultanée de toutes les couches séparées n'est pas encore au point esthétiquement, les paramètres et modalités du protocole de lamination seront donc à affiner ultérieurement.
  En effet, il serait intéressant de maîtriser ce processus par sécurité au cas où il se produirait un quelconque problème ou différent avec nos fournisseurs, bien que nous nous dirigions actuellement vers la lamination de préforme complète.

Test de lamination : Power Film sans cellules

Une première série consistera à définir la vitesse adéquate pour obtenir une accroche convenable du complexe sur le tissu sans défauts sur le plan esthétique. La composition de la préforme PowerFilm Solar® est visible sur la Figure 114.

- ✓ Epaisseur laminat = 0,5 mm ;
- ✓ Epaisseur laminat sur cuivre = 0,6 mm ;
- ✓ Epaisseur laminat + tissu = 1 à 1,1 mm ;
- ✓ Epaisseur laminat sur cellule = 0,55 mm.

La composition de la préforme contenant la cellule photovoltaïque est décrite sur la Figure 46.

Tableau AA : *Adhérence préforme PowerFilm Solar® en fonction de la vitesse de lamination*

lamination classique **Power Film : influence de la vitesse**			
température (°C)	vitesse (m/min)	charge moyenne (N)	charge à la crête (N)
140	2	22,88	29,51
	1,5	30,45	42,18
	1,2	36,93	46,85
	1	41,38	50,98
	0,8	48,28	60,18
	0,6	67,21	76,53
	0,3	87,63	104,86

On observe logiquement une accroche croissante avec la baisse de la vitesse.

Lorsque l'on s'approche des basses vitesses, on observe la formation de plis dans le complexe et de lignes creusées dans le sens de la laize.
A l'inverse pour des vitesses trop élevées, il se forme également des lignes mais plutôt dans le sens diagonal et à commencer par les bords de l'échantillon laminé.

La fourchette de vitesse pour laquelle l'aspect de surface reste propre et régulier se situe entre 0,8 et 1,2 m/min pour la température de 140 °C.
Visuellement, le meilleur résultat est obtenu à 140 °C et 1 m/min.

A 150 °C, on obtient des résultats assez similaires bien que légèrement en deçà mais avec des charges moyennes de délamination un peu supérieures.
Pour cette température, la vitesse la plus adaptée est de 1,2 m/min (150°C).

Pour des températures supérieures, il devient de plus en plus difficile d'obtenir un aspect convenable. On observe alors un réseau de lignes d'abord dans le sens de la laize puis sur tout le complexe un peu apparenté à un circuit imprimé en électronique.

Sous 140 °C, il reste très peu de marge de manœuvre car la température de fusion du TPU se situe aux alentours de 132 °C.

En se basant sur ce résultat à vitesse et température constantes, les tests suivants sont réalisés en faisant varier tous les autres paramètres qui peuvent éventuellement intervenir.

Tableau BB : *Adhérence préforme PowerFilm Solar® en fonction des conditions de lamination*

lamination à 140 °C et 1 m/min sur Orchestra Max **Power Film® : influence des conditions de lamination**		
conditions de lamination	charge moyenne (N)	charge à la crête (N)
témoin (orchestra max)	41,39	50,98
refroidissement rapide en sortie	45,85	57,05
refroidissement progressif en sortie	44,96	54,04
sur 50 TT	34,84	42,44
pression tapis baissée à 5 bars	30,56	40,37
sous tissu chaud	30,72	40,97
sous tissu chaud en bord de laminat	35,55	44,32
passage dans calandre	62,03	111,33
sous tissu froid et dans calandre	47,97	60,71

- le refroidissement en sortie paraît en théorie une option intéressante, il permet de figer le TPU tel quel en sortie du processus. Il a été réalisé ici très artisanalement en étalant le tissu à l'extérieur de l'usine sur une tôle métallique froide mais on pourrait imaginer une sorte de caisson frigorifique disposé en début de table de sortie.
  En pratique, les valeurs mesurées sont effectivement supérieures à l'échantillon exposé à la température ambiante mais ce qui est étonnant c'est que l'on observe le même phénomène avec un échantillon refroidi progressivement près d'une source de chaleur.
  Les tests concernant ces options devront donc être complétés afin d'en définir le réel intérêt.

- On constate que l'Orchestra Max convient mieux que le 50 TT en permettant une meilleure accroche.

- Il est inutile de diminuer la tension du tapis sur le rouleau.

- L'échantillon passé dans la calandre se trouve lissé et a perdu son aspect poreux, il est visuellement très correct et possède la meilleure adhérence.
  Le fait que le TPU fonde plus que sur les autres échantillons et que la surface soit beaucoup plus lisse rend la moindre imperfection visible aussi c'est la reproductibilité d'un échantillon de bonne qualité qui serait compromise.

- L’ajout d’un tissu au dessus de l’ensemble, qui se situera donc entre la couche supérieure du complexe et le rouleau chauffant diminue considérablement l’accroche, mais permet d’obtenir de meilleurs résultats en terme d’esthétique (bord plus propre, homogénéité des parties transparentes et évite le dépôt de TPU sur le rouleau ce qui laissait des marques sur le tissu ou sur la cellule suivante).

- D’autre part, le tissu permet de passer dans la calandre sans risques de détériorer la cellule et ainsi de rattraper largement le niveau d’accroche précédemment obtenu voire même de l’améliorer.

Remarque : On notera que l’accroche est meilleure sur quelques millimètres au bord du laminat et donc lorsque l’on prend un échantillon de 5 cm de largeur qui longe exactement le bord du laminat et qui inclue alors ces quelques millimètres, cela suffit pour augmenter significativement la force nécessaire à la délamination : on passe de 30,7 N à 35,5 N.

Le tissu supplémentaire ralentit le transfert thermique ce qui explique la diminution de l’accroche avant de passer dans la calandre. Mais la surface de la cellule étant protégée on peut imaginer revoir les valeurs de température et de vitesse, c'est-à-dire très certainement augmenter la température et ralentir un peu le processus afin d’augmenter encore la pénétration du TPU dans le tissu.

Une batterie de test permettant d’évaluer l’intérêt d’un recadrage de ces paramètres a été réalisée.

Tableau CC : *Adhérence préforme PowerFilm Solar® avec un tissu de protection*

Lamination sous tissu protecteur **Power Film : protection et calandre**				
température (℃)	vitesse (m/min)	Calandre	charge moyenne (N)	charge à al crête (N)
140	1	Non	30,72	40,97
		Oui	47,97	60,71
	0,8	Non	17,26	24,04
		Oui	40,47	50,12
	0,6	Non	32,95	41,5
		Oui	49,03	57,33
	0,3	Non	67,7	82,97
		Oui	74,66	87,41
150	1	Non	27,36	43,41
		Oui	52,07	66,97
	0,8	Non	33,93	43,09
		Oui	56,45	70,94
	0,6	Non	34,51	44,92
		Oui	64,93	76,7
170	1	Non	39,19	55,65
		Oui	65,67	78,21
	0,8	Non	39,58	54,93
		Oui		
	0,6	Non	50,04	67,24
		Oui	81,87	140,21

- La température de 170 ℃ semble trop élevée pour n e pas détériorer la surface et si l'on augmente encore la vitesse, l'adhérence ne serait plus suffisante.
- Sans la calandre, l'accroche est nettement inférieure et surtout, aussi légère soit elle selon les températures, on garde toujours une différence de couleur entre le centre et le bord de l'échantillon.
- La calandre permet d'uniformiser parfaitement la couleur, de mieux faire pénétrer le TPU et donc d'améliorer l'accroche et le toucher des bords du laminat.
- Les meilleurs échantillons sont : 150℃ ; 0,8 m/ min
  150 ℃ ; 1 m/min

140 ℃ ; 0,6 m/min
140 ℃ ; 0,8 m/min

Avec tous les éléments de comparaison confondus, le premier des quatre paraît être le meilleur.

Commentaires annexes

Pour l'instant, il est nécessaire pour engager le laminat sur le tissu de le fixer avec un scotch papier qui laisse ensuite une trace visible. Les modifications qui seront apportées à la machine doivent normalement permettre de s'affranchir de cette technique.

N'ayant pas de cellules fonctionnelles à laminer, les paramètres ont été définis sans prendre en compte la conservation des propriétés électriques.
On a pu constater que le cuivre des connexions se dilatant il crée des ondulations. Les cellules livrées étaient non fonctionnelles et ne contenaient du cuivre que sur une très petite partie des connexions, il n'a donc pas été possible de s'attarder sur le problème